

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Diseño y Construcción de una Máquina CNC de Corte y Grabado.**

Proyecto Técnico

**Esteban Andrés Fernández Dávalos**

**Ingeniería Mecánica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Mecánico

Quito, 4 de diciembre de 2018

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**  
**COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS**

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Diseño y Construcción de una Máquina CNC de corte y grabado**

**Esteban Andrés Fernández Dávalos**

Calificación:

Nombre del profesor:

Alfredo Valarezo, Ph.D.

Co-Director:

Carlos Andrade, M.Sc

Firma del profesor:

---

Co-Director:

---

Quito, 4 de diciembre de 2018

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

---

Nombres y apellidos:

Esteban Andrés Fernández Dávalos

Código:

00117251

Cédula de Identidad:

1724018237

Lugar y fecha:

Quito, 4 de diciembre de 2018

## RESUMEN

Dentro del área de automatización, las máquinas de alta precisión guiadas por computadora (CNC) son sistemas costosos, que permiten realizar múltiples tareas de maquinado (mediante sustracción de material) y de manufactura aditiva también (mediante depósito de material: soldadura, metalización, impresión 3D) gracias a su capacidad de generar piezas rápidamente, de forma sencilla y con mejor precisión que los procesos de manufactura tradicionales. El objetivo de este estudio es el de determinar y aplicar los parámetros de construcción y calibración de una máquina CNC para realizar procesos de grabado y corte de plancha de madera MDF de 3mm de espesor de manera precisa. Se desarrollan los planos de taller para la construcción de la parte estructural y mecánica, y se ubican los sistemas electrónicos que estarán controlados por el software de CNC. El propósito que se desea plantear es que la máquina sirva como herramienta de aprendizaje de CAD/CAM para los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad San Francisco de Quito y su diseño está pensado para realizar grabado o corte mediante fresado en una escala comparable con la pequeña y mediana industria. Se realizaron las pruebas de maquinado sobre madera MDF de 3 milímetros de espesor bajo los parámetros constantes de avance de 220mm/min y avance vertical de 1mm por paso. Se determinó la calidad del acabado superficial mediante inspección visual y se determinó la precisión del maquinado comparando las dimensiones entre el software (CAD) en la computadora, con el resultado (CAM) sobre el material de prueba. Finalmente, se construyó una máquina de grabado CNC de 3 ejes con capacidad de grabar y cortar madera tipo MDF y balsa de 10mm de espesor mediante el proceso de fresado. Al realizar las pruebas, se determinó que la máquina tiene una tolerancia de  $\pm 0.5\text{mm}$  por cada 10m de corte.

Palabras clave: CNC, velocidad de avance, fresado, automatización, grabado.

## ABSTRACT

Computer controlled high precision machinery (CNC) are expensive systems that allow multi-tasking machining duties (through material subtraction), and also additive manufacturing (through additive welding layers, metallizing, 3D impression) due to its power to manufacture parts faster, with easy handling, higher quality and with higher precision than traditional manufacturing methods. The present project seeks to determine the construction and calibration parameters of a CNC machine to perform milling and engraving on 3mm thick wooden and acrylic materials. The blueprints for mechanical and structural design, as well as the electronics setup and software settings, were developed for a CNC software to control them. This project seeks to construct a CNC teaching tool for Universidad San Francisco de Quito's CAD/CAM students and it is designed to perform cutting and engraving for small and medium scale industries. The machining tests were done on 3mm thickness MDF wood under the constant parameters of 220mm/min feedrate and 1mm stepdown. The final quality was visually inspected, and the machining precision was established through comparison between the dimensions of the CAD software (on the computer), and the CAM piece result. Finally, a 3 axis CNC machine was built with milling and engraving capabilities, to perform machining on 10mm thick wooden plates and engraving on acrylic materials. After the tests, it was determined that the machine has a tolerance of  $\pm 0.5\text{mm}$  for every 10 meters of cutting job.

*Key words:* CNC, feedrate, milling, automation, engraving.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Resumen .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>5</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>10</b>
<b>Materiales y Métodos.....</b>	<b>12</b>
<b>Materiales.....</b>	<b>13</b>
<b>Desglose de piezas .....</b>	<b>15</b>
<b>Presupuesto .....</b>	<b>16</b>
<b>Ensamble electrónico y software .....</b>	<b>17</b>
<b>Cálculos y Simulación estructural.....</b>	<b>20</b>
<b>Métodos de calibración y precisión.....</b>	<b>25</b>
<b>Especificaciones del diseño -términos de referencia-.....</b>	<b>32</b>
<b>Modo de uso de la máquina .....</b>	<b>33</b>
<b>Diagrama de flujo de proceso .....</b>	<b>36</b>
<b>Diseño del experimento.....</b>	<b>37</b>
<b>Resultados .....</b>	<b>40</b>
<b>Discusión.....</b>	<b>45</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>47</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>49</b>
<b>Anexo A: Motor NEMA17 KL17H248-15-4A Data sheet.....</b>	<b>51</b>
<b>Anexo B: Instalación Dolly .....</b>	<b>52</b>
<b>Anexo C: Plano General .....</b>	<b>53</b>
<b>Anexo D: Perfil Pórtico 1300mm .....</b>	<b>54</b>
<b>Anexo E: Plano Perfil Pórtico 300mm .....</b>	<b>55</b>
<b>Anexo F: Plano Rieles eje X, Y .....</b>	<b>56</b>
<b>Anexo G: Plano Dolly .....</b>	<b>57</b>
<b>Anexo H: Plano Placa Soporte.....</b>	<b>58</b>
<b>Anexo I: Plano Z Plate.....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo J: Plano Portaherramienta .....</b>	<b>60</b>
<b>Anexo K: Plano Estructura Base .....</b>	<b>61</b>
<b>Anexo L: Torque tornillo de potencia .....</b>	<b>62</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1: Glosario de componentes .....</b>	<b>16</b>
<b>Tabla 2: Presupuesto de construcción .....</b>	<b>17</b>
<b>Tabla 3: Parámetros TDR .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 4: Resultados de las iteraciones de calibración.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 5: Coordenadas nivelación eje Z .....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 6: Velocidad experimental.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 7: Resultados de medición cuadrados.....</b>	<b>43</b>
<b>Anexo A: Motor NEMA17 KL17H248-15-4A Data sheet.....</b>	<b>51</b>
<b>Anexo B: Instalación Dolly .....</b>	<b>52</b>
<b>Anexo C: Plano General .....</b>	<b>53</b>
<b>Anexo D: Perfil Pórtico 1300mm .....</b>	<b>54</b>
<b>Anexo E: Plano Perfil Pórtico 300mm .....</b>	<b>55</b>
<b>Anexo F: Plano Rieles eje X, Y .....</b>	<b>56</b>
<b>Anexo G: Plano Dolly .....</b>	<b>57</b>
<b>Anexo H: Plano Placa Soporte .....</b>	<b>58</b>
<b>Anexo I: Plano Z Plate.....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo J: Plano Portaherramienta .....</b>	<b>60</b>
<b>Anexo K: Plano Estructura Base .....</b>	<b>61</b>
<b>Anexo L: Torque tornillo de potencia .....</b>	<b>62</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Vista isométrica del bastidor y dirección de los ejes .....	513
Figura 2: Segundo momento de inercia del tubo usado; cálculo realizado en Inventor 2016 .....	514
Figura 3: Plano de conjunto especificando las partes.....	515
Figura 4: Vista de detalle del Dolly superior .....	15
Figura 5: Conexión para una impresora 3d con un Arduino Mega y una careta RAMPS V1.4 .....	18
Figura 6: Diagrama de conexión para el sensor inductivo .....	19
Figura 7: Plano de conexión para la caja de control de la máquina .....	20
Figura 8: Simulación con tipo de elemento <i>BEAM</i> sobre los rieles longitudinales.. .....	22
Figura 9: Resultado de desplazamiento máximo en mm para una carga de 300N... .....	23
Figura 10: Resultado de desplazamiento máximo en mm para 110N .....	24
Figura 11: Conexión compartida mediante una “Y” entre ambos motores del eje Y.. .....	28
Figura 12: <i>Blocker</i> del tornillo de bolas señalando la posición de dos prisioneros... .....	28
Figura 13: Diagrama de posiciones de calibración del tablero MDF .....	30
Figura 14: Interfaz de <i>PronterFace</i> al enviar el comando M114 de posición .....	31
Figura 15: Interfaz de <i>PronterFace</i> .....	33
Figura 16: Mensaje de conexión exitosa entre la máquina y <i>PronterFace</i> .....	34
Figura 17: Botón <i>HOME</i> máquina de <i>PronterFace</i> .....	34
Figura 18: Diagrama de flujo para manufactura de una pieza mediante maquinado CNC... .....	36
Figura 19: Arreglo de cuadrados en <i>ArtCam</i> para realizar la medición de precisión de corte .....	37
Figura 20: Parámetros de <i>ArtCam</i> para la herramienta tipo cónica en V .....	38
Figura 21: Resultado de la simulación para la experimentación de corte de cuadrados ....	39
Figura 22: Calibración de distancia del eje Y .....	40
Figura 23: Origen de la máquina en $X=0$ , $Y=0$ .....	41
Figura 24: Resultados de corte sobre MDF .....	42
Figura 25: Resultados de medición de los agujeros .....	43
Figura 26: Grabado sobre MDF y balsa realizado con la máquina CNC.....	44
Anexo A: Motor NEMA17 KL17H248-15-4A Data sheet.....	51
Anexo B: Instalación Dolly .....	52
Anexo C: Plano General .....	53



<b>Anexo D: Perfil Pórtico 1300mm .....</b>	<b>54</b>
<b>Anexo E: Plano Perfil Pórtico 300mm .....</b>	<b>55</b>
<b>Anexo F: Plano Rieles eje X, Y .....</b>	<b>56</b>
<b>Anexo G: Plano Dolly .....</b>	<b>57</b>
<b>Anexo H: Plano Placa Soporte .....</b>	<b>58</b>
<b>Anexo I: Plano Z Plate .....</b>	<b>59</b>
<b>Anexo J: Plano Portaherramienta .....</b>	<b>60</b>
<b>Anexo K: Plano Estructura Base .....</b>	<b>61</b>
<b>Anexo L: Torque tornillo de potencia .....</b>	<b>62</b>

## INTRODUCCIÓN

Las máquinas de Control Numérico Computarizado (CNC) son aplicadas en múltiples ramas de la manufactura y son usadas para procesar piezas en la industria del acero, plástico, madera, entre otros. Estas máquinas realizan varias operaciones, de las que se destacan el taladrado, fresado, granallado y corte (Koc, Erdinler, Hazir, & Öztürk, 2017). En la actualidad, este tipo de maquinaria puede ser encontrado en casi cualquier industria manufacturera e incluso en laboratorios especializados y universidades (Ambrizal, Farooqi, Alsultan, & Yusoff, 2017). El amplio uso de esta tecnología se debe principalmente a que proporcionan un aumento en la productividad, favoreciendo la eficiencia en un factor de 2.5 veces, con sistemas de automatización (Koc et al., 2017). El maquinado mediante CNC moderno tiene alta precisión, alta flexibilidad y es imprescindible destacar que la precisión no suele ser comprometida con la rapidez. Sin embargo, en comparación con otros procesos de automatización (como manufactura aditiva), se ha demostrado que la flexibilidad de los productos finales obtenidos es relativamente imperfecta (Amanullah, Murshiduzzaman, Saleh, & Khan, 2017).

Por lo tanto, el colegio Politécnico de la Universidad San Francisco de Quito, ha incentivado la compra y uso de maquinaria CNC en sus instalaciones. A pesar de ello, hasta ahora no hay maquinaria que realice corte sobre planchas de material. Esto se debe principalmente a que este tipo de maquinaria es costosa. Es por ello, que se plantea la implementación de una máquina CNC de bajo costo que realice las funciones de grabado y corte por fresado en el taller del laboratorio de materiales. Con esta nueva herramienta, se espera que haya una reducción de espacio y tiempo en el maquinado de piezas, debido a su capacidad de realizar trabajos de corte y grabado rápidamente, de forma precisa, usando el mismo cabezal de herramienta.

De esta manera, la construcción de una máquina CNC podría facilitar el desarrollo de proyectos en la rama de CAD/CAM. A su vez, podrá abaratar costos de producción de

prototipos y reducir el tiempo de fabricación de piezas. El diseño y desarrollo de esta máquina CNC de 3 ejes tendrá un cabezal de fresado que podrá realizar corte y grabado sobre madera tipo MDF y acrílico. Se medirá la exactitud del corte sobre MDF únicamente.

Gran parte de los problemas que surgen cuando se trabaja con el maquinado de materiales de madera se debe a que no está claro los parámetros apropiados para el procedimiento (Koc et al., 2017). Para determinar la calidad del corte y del grabado se debe considerar estos parámetros que se ven reflejados en la rugosidad de la pieza final. Se ha reportado que la rugosidad cambia significativamente con la dependencia de los parámetros como resultado del fresado en maquinaria CNC (Nas, Samtas & Demir, 2012). Es por este motivo que se establecerá una tasa de corte (*feedrate*) que brinde un acabado de rugosidad óptimo. Sin embargo, este efecto estará limitado por las características propias del motor de fresado.

Dentro del diseño y desarrollo de la CNC, se busca realizar una máquina que sea liviana en su parte superior, pero que sea resistente y firme. A su vez, se plantea que el cabezal portaherramientas sea fácil de extraer y cambiar. Debido a que se dispone de una mesa sobre la cual construir el *router* de la máquina, se consideró el diseño en base a las dimensiones de esta. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es el de diseñar y construir una máquina de control numérico computarizado capaz de realizar grabado y corte sobre madera MDF de 3mm de espesor. La máquina debe tener la capacidad de moverse en 3 ejes con movimientos suaves, que permitan alta precisión. Se realizará el maquinado de figuras geométricas con las que se establecerá la exactitud del corte. Finalmente, en el diseño se tomará en consideración posibles innovaciones sobre la máquina, por lo que se usarán uniones no permanentes y se dejará espacio suficiente para nuevos dispositivos. Se espera un error de exactitud geométrica de corte y grabado, no mayor al 2%. Esto implicaría un desfase de 2mm en una línea de 100mm de largo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El modelado 3d de la máquina CNC fue realizado en Autodesk Inventor 2016. En base al torque requerido, se estableció el tipo de motor. Los motores fueron fijados a la estructura y a tornillos de potencia en cada eje. Se usará *Marlin* y *PronterFace* para el software que controlará los motores. Este programa estará cargado en un Arduino, que actuará como cerebro de todo el mecanismo. La construcción de la máquina CNC se concibió en tres etapas: montaje mecánico (rieles, bastidor, pórtico, dollys); montaje eléctrico (sensores de final de carrera, motores, cerebro) y la instalación del sistema de control (software).

El software precisa la cantidad de pasos por revolución requeridos por el motor. Para ello, dependiendo de la geometría del tornillo, se definirá la cantidad de pasos para cada eje. Debido a que se usarán los mismos motores y tornillos en todos los ejes, será la misma configuración para todo el sistema. La cantidad de revoluciones por pulso se obtiene calculando el paso del husillo. Tras el montaje del dispositivo se debe comprobar que no haya efectos de retroceso, que afectarán la precisión de la máquina (Ambrizal et al., 2017). Dependiendo del efecto de retroceso se determinará una velocidad máxima de avance.

Para determinar la exactitud del corte y grabado, se realizarán figuras geométricas cuadradas a distintas posiciones de la mesa de corte. Se realizarán los dibujos CAD en AutoCad 2016 para exportarlos en formato DXF. Luego de esto, se establecerán las rutas de fresado, profundidad, velocidad de avance, revoluciones por minuto y tipo de herramienta en *ArtCam* 2008. Tras establecer los parámetros de corte, se exportará el archivo .nc que contiene el código G. Se cargará el código G a *PronterFace*, se llevará a cero el cabezal de corte, y se correrá el programa. Una vez realizado el corte y grabado, se medirá las dimensiones de la pieza con un calibrador Vernier y se comparará con lo dispuesto en el dibujo de AutoCad.

### a. Materiales

El prototipo construido en este proyecto incluye dirección lineal en los ejes x, y, z. El desplazamiento máximo en dirección *X* es de 1300mm; en el eje *Y*, de 1500mm y en *Z* de 70mm. En la figura 1 se expone la orientación de los ejes utilizados en este proyecto.

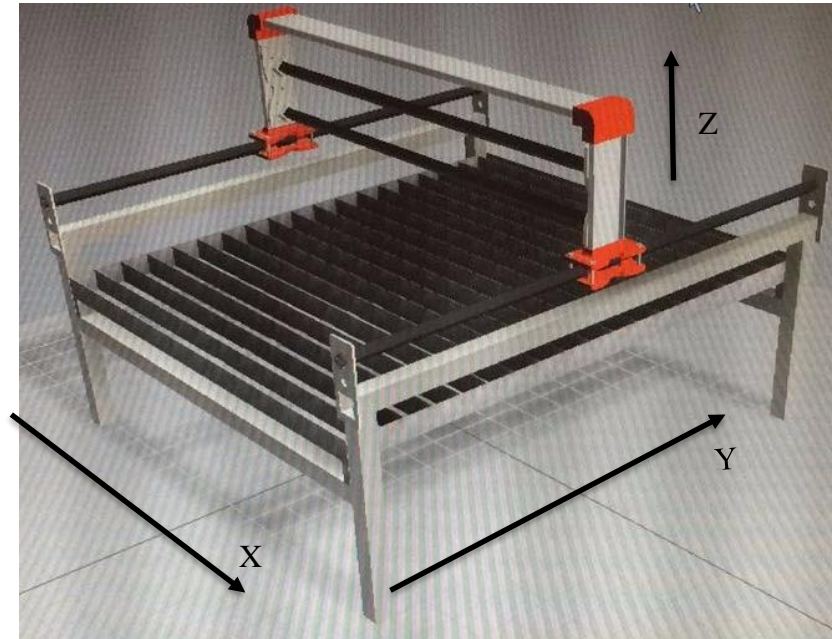


Figura 1: Vista isométrica del bastidor y dirección de los ejes.

La estructura del bastidor está compuesta por acero ASTM A-36 galvanizado; acero inoxidable AISI 304 para el pórtico y tubo cuadrado de 25mm X 1.1mm de espesor para los rieles. Los elementos como los *dollies*, los codos fueron producidos mediante impresión 3d y son de PLA (polímero con propiedades similares al PET).

En la figura 2 se expone la inercia del tubo cuadrado al estar dispuesto con una orientación rotada 45° (en forma de rombo), para aprovechar la resistencia a esfuerzos de flexión que ofrece esta geometría.

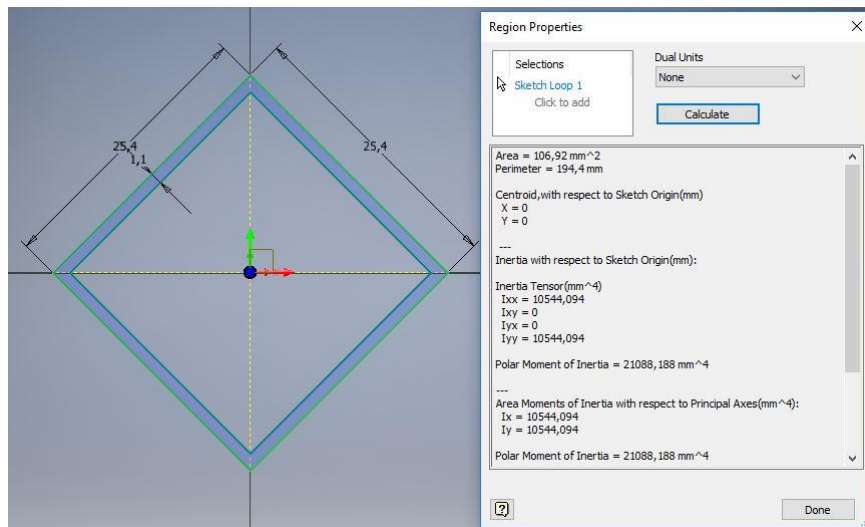


Figura 2: Segundo momento de inercia del tubo usado; cálculo realizado en Inventor 2016.

En las piezas impresas en 3d se establecieron los parámetros de relleno de 25% y un patrón de relleno lineal. Se estableció que el relleno sea mínimo para ahorrar material y tener piezas livianas. Esto se debe a que la carga sobre estos elementos está dispuesta de manera compresiva sobre el material y esto implica que su resistencia mecánica no se vea comprometida.

Se usarán tornillos de potencia con acoples de rodamientos para transmitir el torque del motor al *dolly*, y así transmitir el movimiento a la parte superior del pórtico. Se podrían usar motores DC sin escobillas que proveen alto torque, sin embargo no proveen suficiente retroalimentación y son complicados de establecer la posición del eje de manera precisa (Ambrizal et al., 2017). Por lo tanto, se estableció que se usarán motores de paso tipo NEMA 17 y estarán conectados a un Arduino Mega 2560 que tendrá montado una careta CNC RAMPS v1.4. Se fijarán dos motores en el eje *Y*; uno en el extremo del eje *X*; y uno en la parte superior del eje *Z*. Todos los motores serán independientes, a excepción del par perteneciente al eje *Y*, que compartirán la conexión entre ellos.

La herramienta de corte y grabado será un motor magnético de 12-24V. Mediante un acople con prisioneros se fijará la fresa al eje del motor. El motor será conectado directamente a la fuente y mediante un *switch* podrá ser accionado. Para realizar grabado, se usará la misma

herramienta, pero se fijarán los parámetros de profundidad y avance correspondientes desde el software *ArtCam*.

### b. Desglose de piezas.

El modelado 3d de la máquina CNC fue realizado en Inventor 2016. De este modelo se extrajeron los planos de taller y el plano de despiece. El glosario de componentes, partes y términos se encuentran en la figura 3 y 4. La tabla 1 y el ANEXO C (plano de conjunto) actuarán como referencia para los términos utilizados. En la figura 1 se expone una porción del plano de conjunto y en la figura 4 un detalle del portaherramienta.

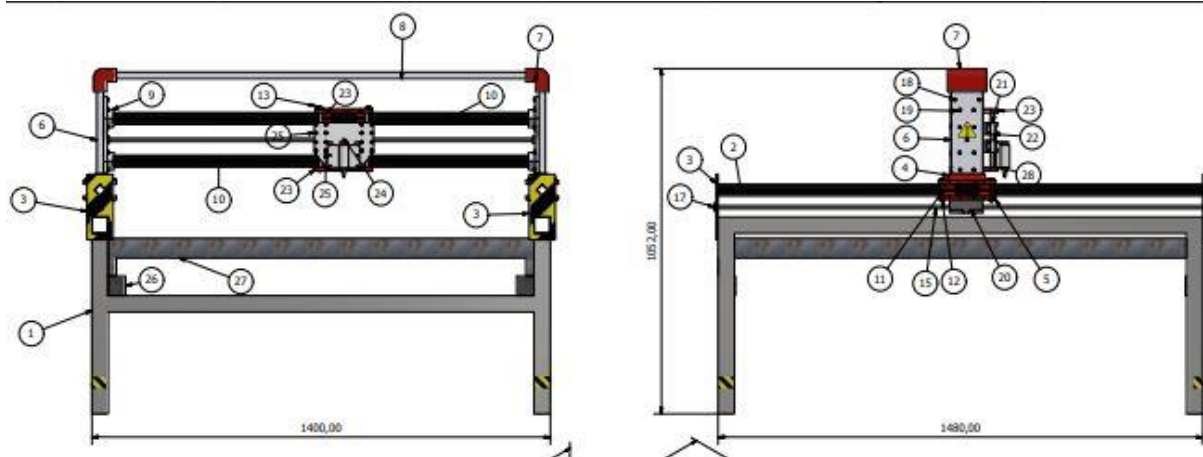


Figura 3: Plano de conjunto especificando las partes.

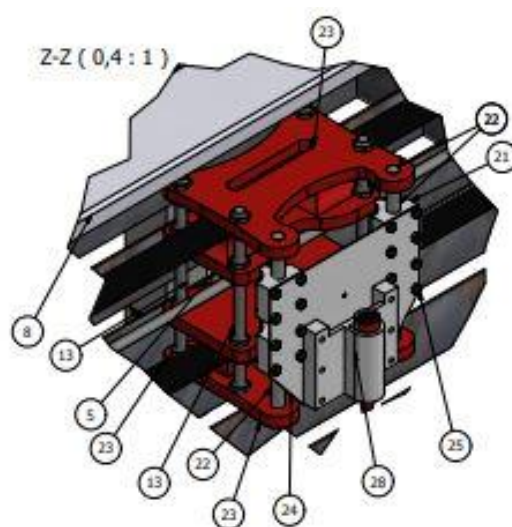


Figura 4: Vista de detalle del *dolly* superior.

La tabla 1 asocia un número de parte al nombre del elemento. En ciertas piezas se agrega una descripción dimensional del mismo, esto se debe a que dichas partes no requieren plano de manufactura. A su vez, las partes que no contienen descripción son aquellas que sí tienen asociadas un plano de manufactura.

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Mesa	
2	2	Tubo riel	25.4mm x 1480mm, 1.1mm espesor
3	4	Acople mesa dolly	
4	2	Dolly	
5	4	Dolly portico	
6	2	Lateral 2	
7	2	Codo	
8	1	Lateral 1	
9	2	Bolsillo riel portico	
10	2	Tubo riel portico	25.4mm x 1300mm x 1.1mm espesor
11	8	ISO 8676 - M8 x 1 x 65	Hexagon head screws with metric fine pitch thread
12	8	ISO 4035 - M6	Hexagon thin nuts (chamfered) - Product grades A and B
13	4	Perno dolly portico	Ø10mm x 200mm
14	28	ISO 4035 - M10	Hexagon thin nuts (chamfered) - Product grades A and B
15	2	Varilla Eje y	Varilla roscada Ø10mm x 1500mm
16	1	Varilla Eje x	Varilla roscada Ø10mm x 1300mm
17	6	ANSI/AFBMA 16.1 - 10 x 22 x 6	Airframe Ball Bearings, Single Row, Rigid, Diameter Series 8, 9
18	20	ISO 4017 - M5 x 25	Hexagon head screws
19	26	ISO 4035 - M5	Hexagon thin nuts (chamfered) - Product grades A and B
20	2	Blocker	
21	4	Linear Bearings	
22	2	Eje Dolly Portico	Ø12mm x 190mm
23	2	Dolly superior	
24	1	Z plate	
25	16	ISO 4018 - M5 x 20	Hexagon head screws. Product grade C
26	4	Aumento h patas	
27	1	Parrilla	
28	1	Herramienta	Representación

Tabla 1: Glosario de componentes.

### c. Presupuesto

El presupuesto fue dividido en dos partes debido a que en el Segundo Semestre 2017-2018 se realizó un avance en la construcción de la máquina como proyecto de *Capstone Desgin* para la clase de Diseño Mecánico II. De igual manera, cabe destacar que aquellos ítems marcados con un asterisco (\*) son aquellos que fueron provistos de otras máquinas pertenecientes a la USFQ. En la tabla 2 se resumen los costos de piezas. Sin embargo, como se reutilizaron



componentes que no fueron necesarios comprar, el costo se redujo a \$384.74 que consistió en la construcción o adquisición del bastidor, sistema electrónico y varillas roscadas. De esta manera, se expone que la inversión realizada en esta fase del proyecto fue de \$276.57.

Presupuesto CNC machine			
Cantidad	Descripción	Costo Unitario [\$]	Costo Total [\$]
1	Tubo cuadrado 25.4mm ASTM A-36, 1.1 mm de espesor x 6000mm.	6,8	6,8
4	Motores NEMA 17*	25	100
10 [m]	Cable Multifilar Gemelo AWG 20	0,5	5
1	CNC Shield*	14	14
1	Arduino SainSmart*	25	25
46	Bearing 606	1,34	61,64
2	Filamento PLA 3 mm	40	80
75	Tuercas anti-vibración	0,06	4,5
75	Tornillos	0,06	4,5
3	Varillas roscadas	7,5	22,5
4	Rodamientos lineales SC12uu	12,5	50
3	Sensores inductivos	45	135
6	Bearing 608zz	1,8	7,2
4	Bearing 625zz	1,9	7,6
<b>Total</b>			<b>523,74</b>
1	Motor de fresado con alto torque 12-24V	10,99	10,99
3	Tornillo de potencia de bolas 10mm x 1500mm	84,86	254,58
1	Fuente de poder 12V 25A 300W	21,99	21,99
<b>Total</b>			<b>276,57</b>

Tabla 2: Presupuesto para la construcción de una máquina de grabado y corte por fresado CNC.

Por lo tanto, se determina que el costo de la máquina con la adquisición de todos los componentes sería de: \$800,31.

#### d. Ensamble electrónico y software.

En el Arduino Mega se cargará el software *Marlin* v1.1.8 que será el que efectúe el movimiento de los motores y servirá de puerto de comunicación entre CPU-Máquina. En el CPU se instalará *PronterFace* que será conectado al Arduino mediante un puerto paralelo de conexión con CPU para la comunicación. Al realizar la instalación de *PronterFace*, se debe especificar el puerto en el cual estará conectada la CNC; caso contrario no se enlazarán para la

comunicación. Finalmente, se hará uso de *ArtCam 2008* para la transformación de archivos CAD a código G. La careta RAMPS se suele usar para realizar impresoras 3d. Sin embargo, se acoplarán las conexiones y el software para que funcione como una máquina de fresado. En la figura 5, Underwood (2011) realizó un esquema de la conexión que se sugiere realizar para una mesa 3d. Se usará este esquema como plantilla para las conexiones realizadas en la máquina de fresado.

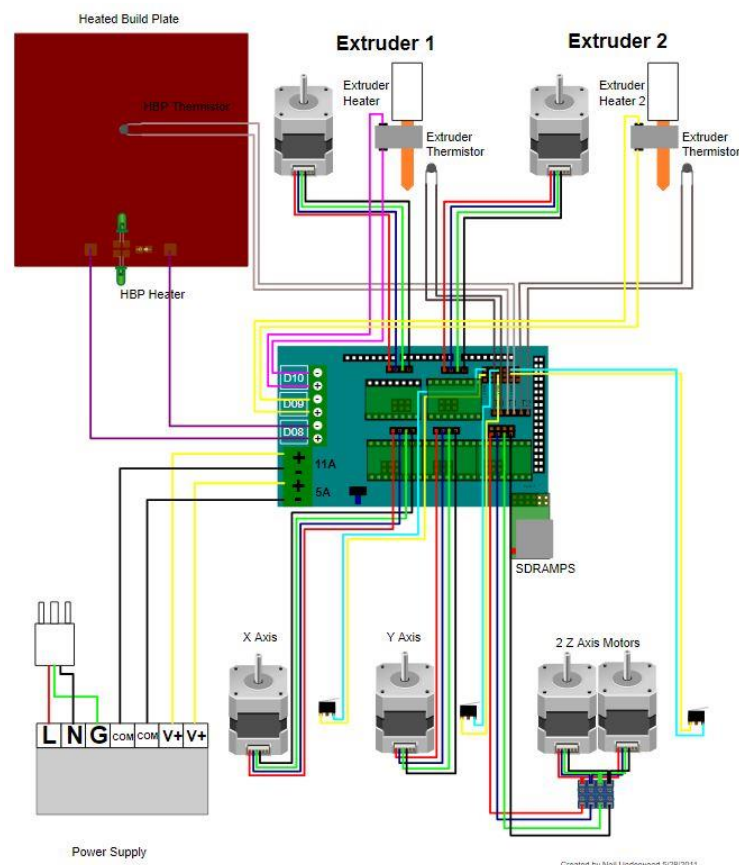


Figura 5: Conexión para una impresora 3d con un Arduino Mega y una careta RAMPS V1.4 (Underwood, 2011)

El esquema de Underwood será aplicado casi en su totalidad, pero se deben realizar ciertas transparencias, además de las conexiones que serán omitidas:

- No se usarán las salidas D8, D9 ni D10, ubicadas junto a los transistores. Esto se debe a que la corriente de salida es de 11A y 5A, respectivamente. Se omiten estos puertos porque los dispositivos utilizados en este proyecto no requieren dicha corriente y

porque no se necesita realizar una conexión a una cama caliente (que es usada en procesos de impresión 3d, no para procesos de fresado).

- El puerto E1 no tendrá ninguna conexión, puesto que sólo habrá una herramienta conectada al dispositivo RAMPS.
- No se usará el puerto AUX-3 en donde se conecta la SDRAMPS. La comunicación con el dispositivo será directa mediante un cable a un CPU.

Por otra parte, la designación de los ejes será cambiada a través del software *Marlin* debido a que Underwood (2011) usa dos motores para el eje Z (para dos extrusores). Sin embargo, la CNC de fresado usará dos motores para movimiento a lo largo del eje Y. De igual manera, se harán uso de *jumpers* para habilitar la capacidad de los motores de realizar *micro stepping*.

Por último, las conexiones de los finales de carrera serán establecidas por tres sensores inductivos. La figura 6 presenta el diagrama utilizado para realizar las conexiones a la máscara RAMPS. Debido a que los sensores operan en un rango de voltaje mayor al del Arduino (que es de 5V), se los conectará directamente a la fuente en un extremo y a un transistor LM7805 en el terminal de señal para transformar el voltaje de salida a 5V.

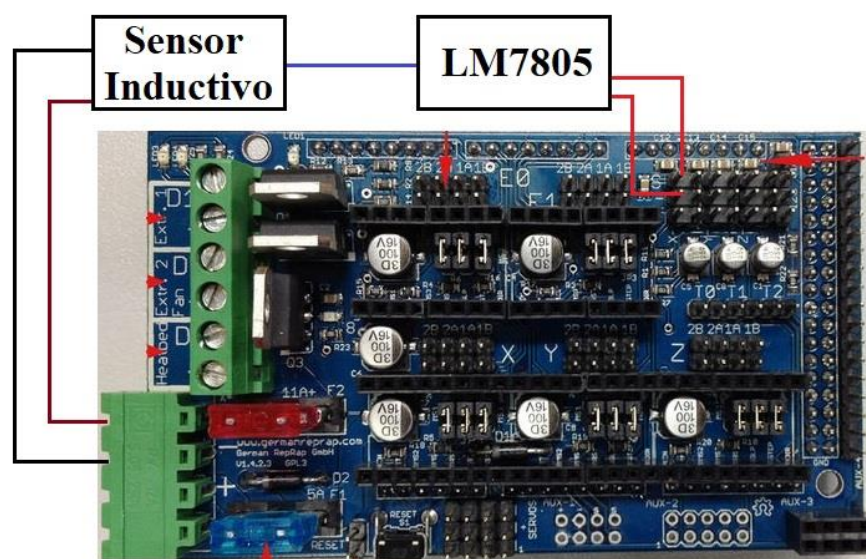


Figura 6: Diagrama de conexión para un sensor inductivo. Elaboración propia.

Por lo tanto, se repetirá esta conexión para los tres sensores y las salidas de tierra y de señal del transistor LM7805 se conectarán en el puerto XMIN, YMIN, ZMAX respectivamente.

Finalmente, se realizó el circuito de conexión dentro de la caja de control para activar el botón de emergencia, el *switch* de encendido, el foco LED, la máscara RAMPS, un ventilador y demás componentes con la fuente de 12V y 25A. La figura 7 expone el plano del circuito utilizado para realizar la conexión de la caja de control. Se consideró toda conexión previa a la máscara RAMPS y al Arduino.

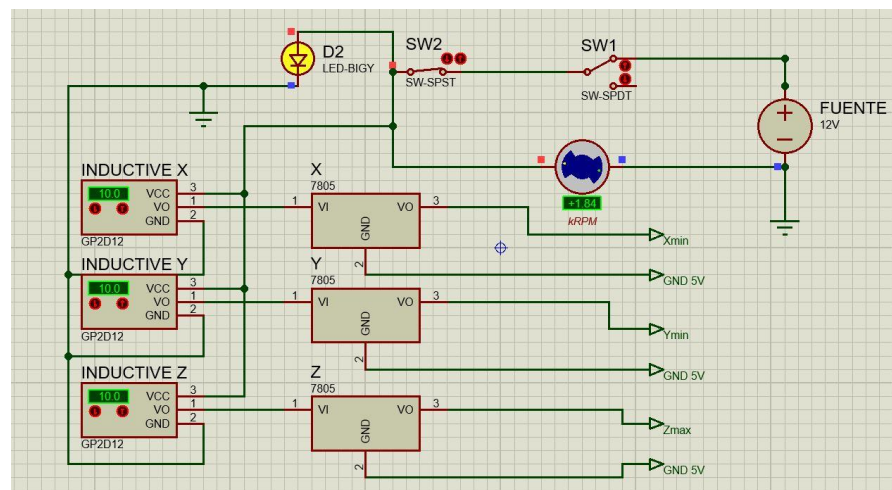


Figura 7: Plano de conexión para la caja de control de la máquina.

#### e. Cálculos y Simulación estructural.

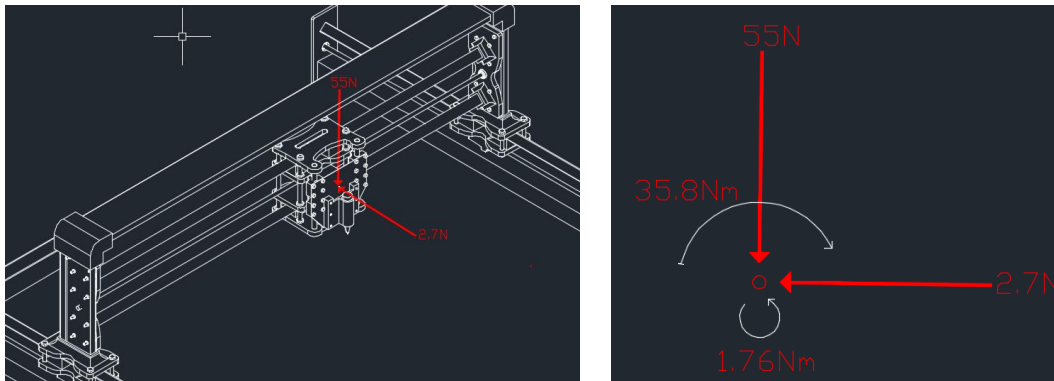
En el modelo computarizado se establecieron materiales, cargas y puntos de anclaje para realizar una simulación de elementos finitos para determinar la deformación que sufre el sistema al estar cargado por su propio peso y por el peso de la herramienta. Se realizó una simulación a 110N que representa los 11kg del pórtico y también una simulación a 300N para representar una herramienta de 19kg sobre el pórtico. De igual manera, debido a que ciertos elementos no son estructurales, se omitieron del estudio los elementos de la parrilla, los tornillos de potencia, los rodamientos donde se asientan los mismos y las alzas usadas para la parrilla.

Por otra parte, se aplicó el modelo matemático realizado por Durovik et al. en el que se relaciona la velocidad de avance, la profundidad de corte y el ángulo de hélice para obtener la fuerza producida por el corte de madera (Durkovic, Mladenovic, Tanovic, & Danon, 2018).

Para, 
$$F_x = 4.16(v_F^{0.328})(c_D^{0.642})(\gamma^{0.015})$$

Donde, 
$$F_x = 4.16 \left( 220 \times 10^{-3} \right)^{0.328} (1)^{0.642} (25)^{0.015} = 2.66N$$

De esta manera, aplicando las fuerzas de 2.66N en dirección (-k) y 55N de peso de la estructura en dirección (-j) sobre el porta herramientas, se procedió a desplazar las fuerzas a un sistema equivalente sobre cada *dolly*, para obtener la configuración de fuerzas siguientes:



Por lo tanto, las fuerzas aplicadas al punto descrito producen momento de 1.76N-m y 35.8N-m. Considerando la geometría del tornillo de potencia, se obtiene el ángulo de hilo de la siguiente forma:

$$\text{Lead angle} = \arctan\left(\frac{l}{\pi \cdot d_m}\right) = 6.3^\circ = \lambda$$

Dado este ángulo, la descomposición de la fuerza normal dada por vencer la fricción generada por el pórtico se desarrolla de la siguiente forma:

$$55N \cdot \sin(6.3) = 5.4N$$

Por otra parte, en el ANEXO L se expone la ecuación de torque del tornillo de potencia. De esta manera, al reemplazar sabiendo que la fuerza axial es de  $5.4N + 2.7N = 8.1N$  y que el hilo es de 5mm, se obtiene que:

$$TB = \frac{F \cdot l}{2000 \cdot \pi \cdot 0.9} = \frac{8.1 \cdot 5}{2000 \cdot \pi \cdot 0.9} = 7.2 \times 10^{-3}$$

De esta manera, aplicando la ecuación de para obtener el cortante máximo en el tornillo de potencia:

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J} = \frac{7.2 \times 10^{-3} N \cdot m \cdot 8 \times 10^{-3} m}{6.43 \times 10^{-9} m^4} = 8.9 kPa$$

Y considerando un material de acero 1.1213, con un módulo de cortante de 80GPa, se obtiene un factor de seguridad de:

$$\frac{80 GPa}{8.9 kPa} = 8.9 \times 10^6$$

Finalmente, se realizó el estudio en el punto más crítico de la configuración de carga por el peso de la estructura, sin considerar fuerzas de corte. El punto más crítico está ubicado en la parte central en el eje  $X$  para el pórtico, y también para el eje  $Y$  en donde se asienta el mismo.

Para determinar la resistencia de los rieles donde estará soportado el pórtico, se realizó una simulación FEA con tipo de elemento *BEAM* de características DIN25x25x1.1. En la figura 8 se observa que la simulación fue realizada con una carga de 150N sobre cada riel con respecto al plano central en dirección  $-\hat{j}$  de cada uno, y que la carga fue dispuesta en la mitad de los rieles que están a lo largo del eje  $Y$ .

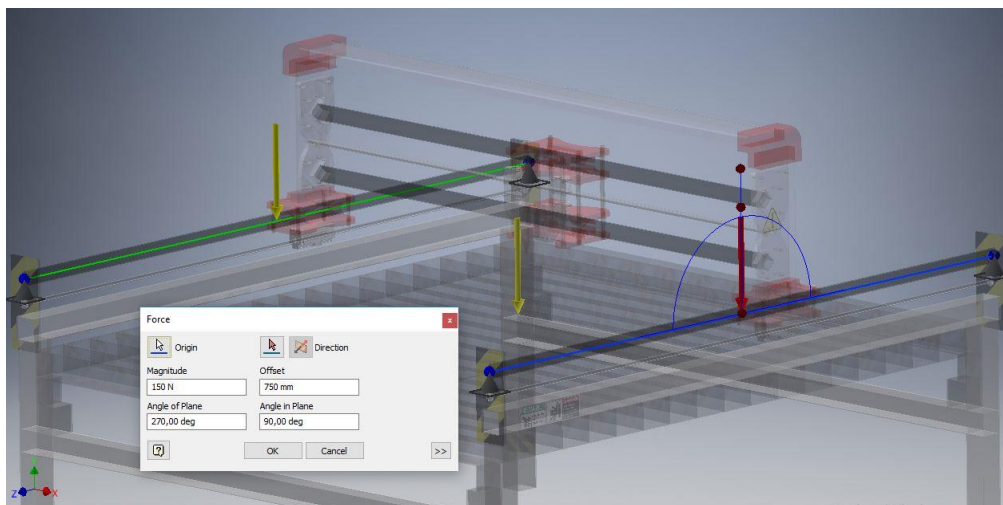


Figura 8: Simulación con tipo de elemento *BEAM* sobre los rieles longitudinales.



Se determinó que la deformación máxima fue de 1.38mm y que las reacciones fueron de 56.88N en cada uno de los puntos de anclaje. Debido a la hipótesis de simetría, los resultados de deformación son iguales para cada riel, al igual que las reacciones. Para efectos de visualización se magnificó el desplazamiento como 1x. En la figura 9 se visualizan los resultados obtenidos a partir de la simulación.

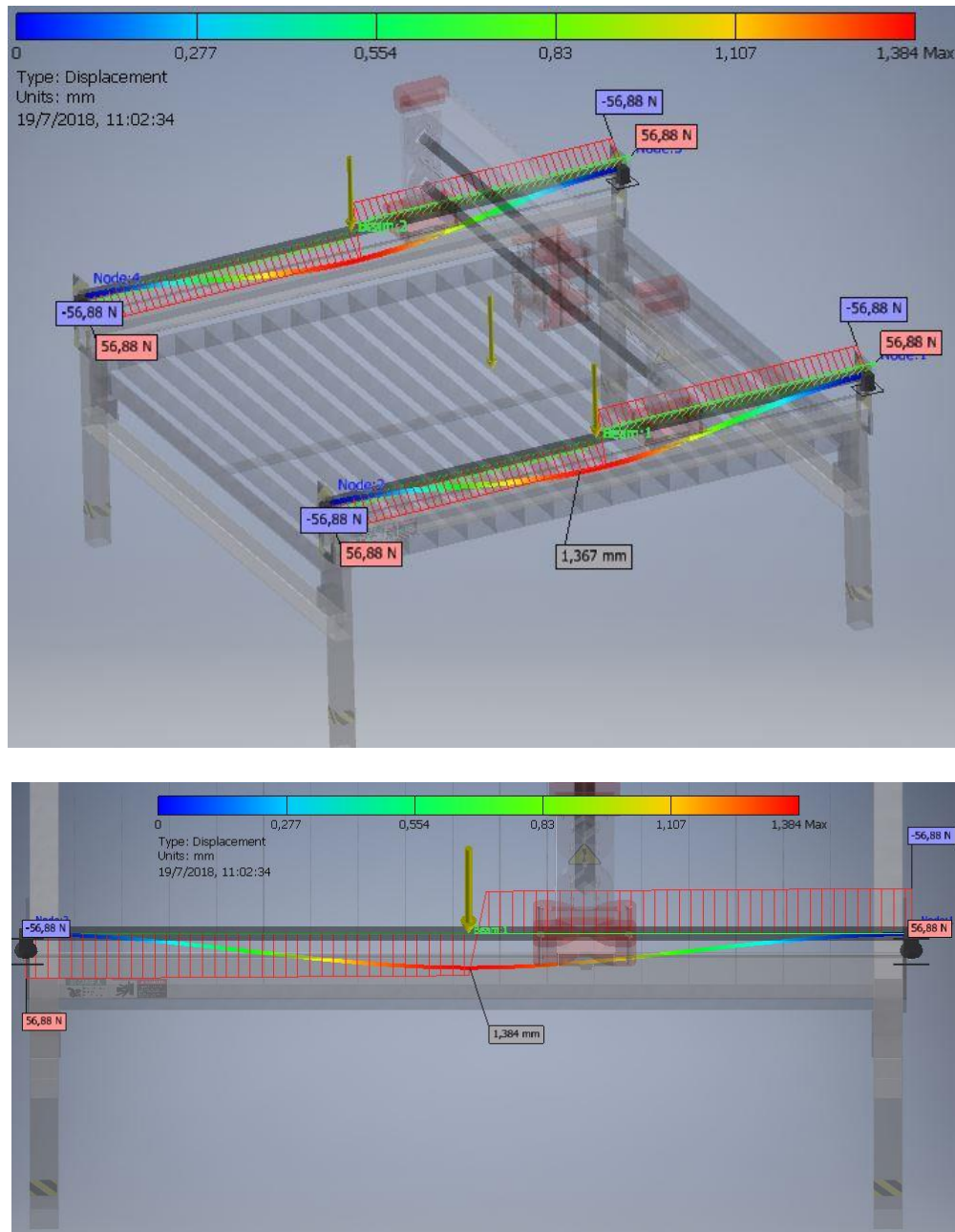


Figura 9: Resultado de desplazamiento máximo en mm para una carga de 300N.

Se realizó el mismo procedimiento para determinar la deformación con el cabezal de herramienta del proyecto. Para la nueva simulación se usaron las mismas restricciones de empotramiento y ubicación de las fuerzas. Sin embargo, la fuerza aplicada fue de 110N distribuida simétricamente sobre los dos rieles. Debido a que el peso del motor de fresado es de 0.233kg, la simulación estará basada simplemente en el peso de la estructura. En la figura 10 se visualiza el resultado de la simulación con la nueva carga.

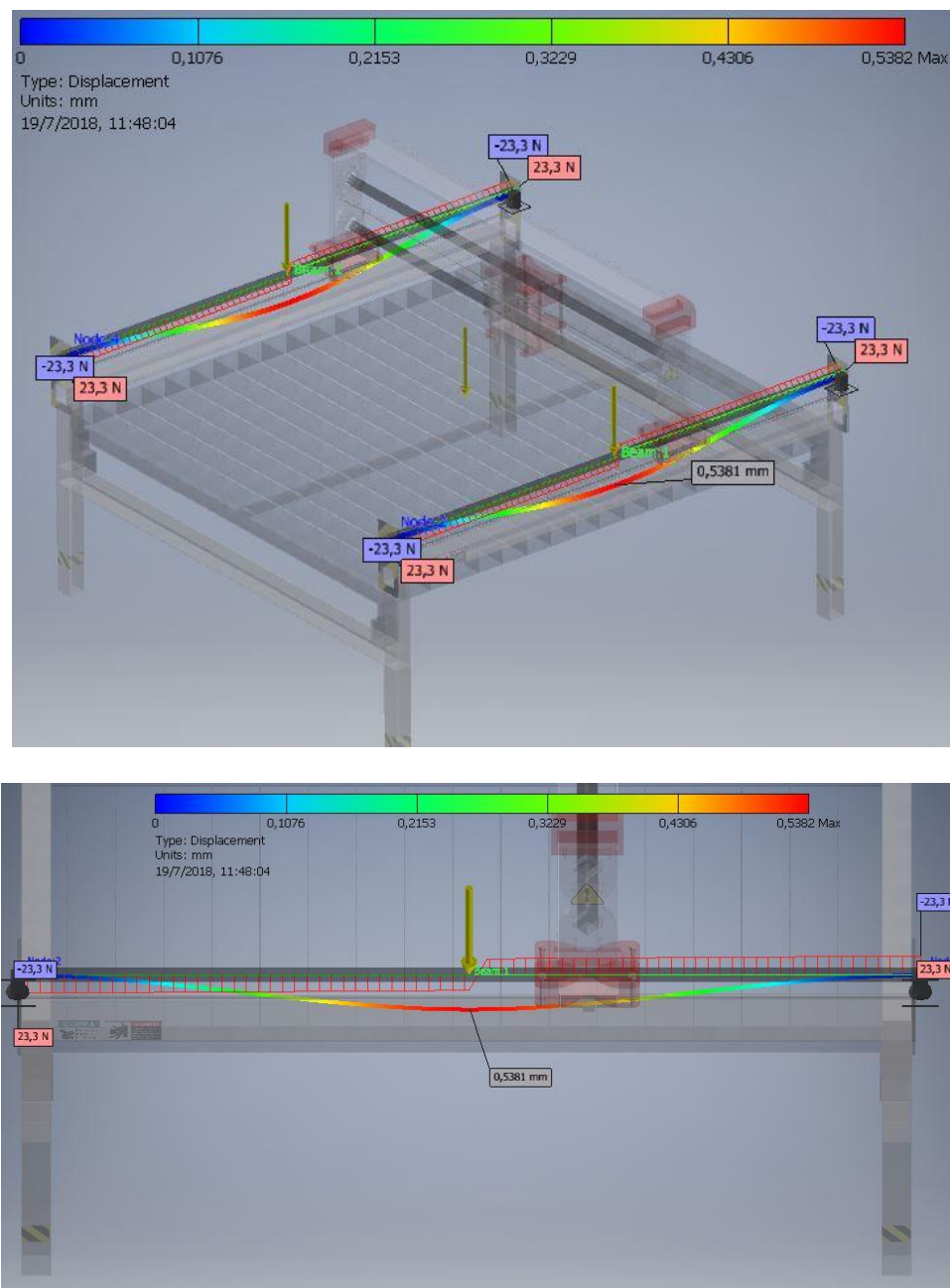


Figura 10: Resultado de desplazamiento máximo en mm para 110N.



Por lo tanto, se determina que el peso de la estructura (11.2kg) ubicado en el punto crítico de cargas, produce una deformación máxima de 0.54mm. Esta carga incluye el peso del motor de fresado y elementos que estarán soportados por los rieles. Por otra parte, se encuentra que si se usara una herramienta de 19kg, produciría una deformación de 1.367mm en el punto crítico.

#### **f.- Métodos de calibración y precisión**

La calibración depende de parámetros pre establecidos desde el software *Marlin* que es cargado al Arduino y de parámetros de construcción y distribución del hardware. Los parámetros del software dan una dimensión de la mesa de trabajo, establecen la posición de los sensores, la velocidad y aceleración de la máquina. Por otra parte, la correcta alineación del hardware permite que la máquina tenga un desempeño óptimo y evita que exista sobrecarga de los componentes. Finalmente, al combinar ambos parámetros en unísono y realizar una afinación entre ellos, se obtiene el potencial máximo de los motores con el controlador puente H.

Inicialmente, para calibrar los parámetros de *Marlin*, se ingresa el valor de pasos por giro del motor. Esta transformación está en función del paso característico del husillo y del motor, y permite que exista sincronía entre la cantidad de pasos y la distancia efectiva medida en milímetros. Por lo tanto, para realizar el cálculo de la cantidad de pasos requeridos para viajar 1mm de distancia, se toman las características del motor Nema 17, que son las siguientes:

<u>Propiedades Nema17</u>	
Corriente	1.5-1.8A
Voltaje	1-4V
Torque	44N.cm
Step angle	1.8 grados

En la ficha de datos del motor NEMA17 KL17H248-15-4A se especifica que el step angle es de 1.8°, lo que quiere decir que son 200 pasos por revolución. Por otra parte, las características del tornillo de potencia SFU1605 utilizado son las siguientes:

<u>Propiedades SFU1605</u>	
Diámetro	16mm
Paso	5mm
Longitud	1500mm

Se especifica que el paso del husillo es de 5mm. Por lo tanto, se realiza el cálculo de la cantidad de pasos que debe realizar el motor para avanzar 1mm lineal al *blocker* montado sobre el husillo, con la siguiente ecuación:

$$\text{Pasos en 1mm} = \frac{\text{Pasos del motor} * \text{microstepping}}{\text{Paso del husillo}}$$

Por lo tanto, se considera que el motor tiene 200 pasos, que el paso del husillo es de 5mm y se aplica un *microstepping* de 16 para así determinar que se necesitan 640 pasos por milímetro. Por lo tanto, los motores Nema 17 conectados al tornillo de potencia SFU1605 deben realizar 640 pasos para avanzar 1mm. Esta información puede ser extrapolada siempre para cualquier distribución de los componentes aquí descritos y sólo dependerá del factor de *microstepping* usado. Finalmente, este dato se ingresa para los tres motores que realizan el movimiento en el plano formado por los ejes X y Y dentro de la pestaña de Configuration.h del archivo de Marlin.ino.

De igual forma, en la pestaña de Configuration.h, en la sección de *Endstop settings* se establece la conexión del sensor inductivo con el software activando la líneas de código siguientes: USE\_XMIN\_PLUG; USE\_YMIN\_PLUG; USE\_ZMAX\_PLUG. La selección (sea MAX o MIN) está en función de la posición de los sensores y del criterio del programador. Por lo tanto, debido a que el sistema tiene ubicado el sensor del eje Y en la parte frontal de la máquina, el sensor X en el lado izquierdo de la misma y el sensor del eje Z en la parte superior, se definen las siguientes líneas: X\_HOME\_DIR -1; Y\_HOME\_DIR -1; Z\_HOME\_DIR 1. Esto implica que la máquina se mueve hacia la dirección negativa en los ejes X y Y, hasta que se activen los sensores inductivos (que son el punto mínimo) y que se mueve en dirección Z

positiva hasta hacer contacto con el sensor ubicado en la parte superior. Por lo tanto, se configura en *Marlin* que la posición mínima de la máquina al hacer contacto con el sensor sea de: X\_MIN\_POS 0; Y\_MIN\_POS 0; Z\_MIN\_POS -70.

A la par de esta acción, la máquina tiene que automáticamente establecer sus dimensiones. Esta automatización se obtiene en la definición de *Bed size*. Se establece la dimensión del eje *X* con la función X\_BED\_SIZE 1000; mientras que para el eje *Y* con Y\_BED\_SIZE 1200. Por lo tanto, cuando la máquina realiza la acción *HOME*, se mueve en dirección *X* negativo; *Y* negativo y *Z* positivo hasta activar los sensores y desde ese punto traza un plano de 1200x1000mm que corresponde a la mesa de trabajo. En el caso de que el usuario envíe desde *PronterFace* una orden a la máquina que conlleve un movimiento más allá de 1200mm en el eje *Y*, o un movimiento mayor a 1000mm en el eje *X*, el software *Marlin* enviaría una señal a *PronterFace* para informar que se ha llegado al límite de la máquina, restringiendo el movimiento.

Para el hardware, es imperativo disponer los motores de manera centrada al husillo y que ambos tornillos pertenecientes al eje *y* estén alineados entre sí. Para realizar la prueba a los motores se varía la velocidad de giro (que se encuentra en mm/min), y se cambian los valores de velocidad en *PronterFace* y *Marlin* a la par que se varía la posición de ajuste del potenciómetro ubicado sobre los puentes H (que son los que realizan la comunicación entre la máscara RAMPS y el Arduino). Para efectos de la construcción, en la figura 11 se ejemplifica cómo se realiza una “Y” entre los cables de señal de ambos motores del eje *Y*, y cómo se la ubica previa a su conexión con el puente H correspondiente a este eje.

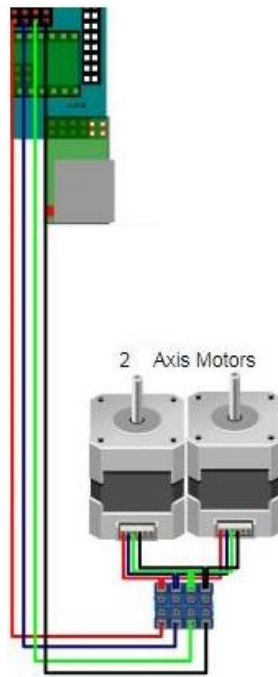


Figura 11: Conexión compartida mediante una “Y” entre ambos motores del eje Y.

Por otra parte, cada husillo tiene un *blocker* con dos retenedores dispuestos al inicio y al final de la pieza. Los retenedores son ajustados mediante dos prisioneros cada uno y el nivel de ajuste determina el torque que el husillo necesitaría realizar para hacer girar al *blocker*. Inicialmente, se encontró que uno de los tornillos viajaba más fácilmente que su par paralelo. Por lo tanto, se procede a soltar ligeramente el retenedor del *blocker* más rígido. En el siguiente diagrama se demuestra la posición de los prisioneros mencionados:



Figura 12: *Blocker* del tornillo de bolas señalando la posición de dos prisioneros. El otro par de prisioneros se encuentra al reverso de la pieza.

Tras soltar los prisioneros y visualizar que el retenedor (caucho blanco entre el husillo y el *blocker* de la figura 12) deje de tener una geometría elíptica para tomar una geometría

circular, se procede a confirmar los parámetros de velocidad máxima para el plano  $X$  y  $Y$ , que es de 450mm/min.

Finalmente, para asegurar que el punto de contacto entre la herramienta y la mesa en el eje  $Z$  sea constante a lo largo del tablero de MDF, se procede a colocar ocho pernos en una distribución homogénea en los bordes del tablero. De esta manera, haciendo uso de los pernos niveladores, se realiza el procedimiento de nivelar el tablero de MDF en 9 puntos ordenados, como se describe en la figura 13.

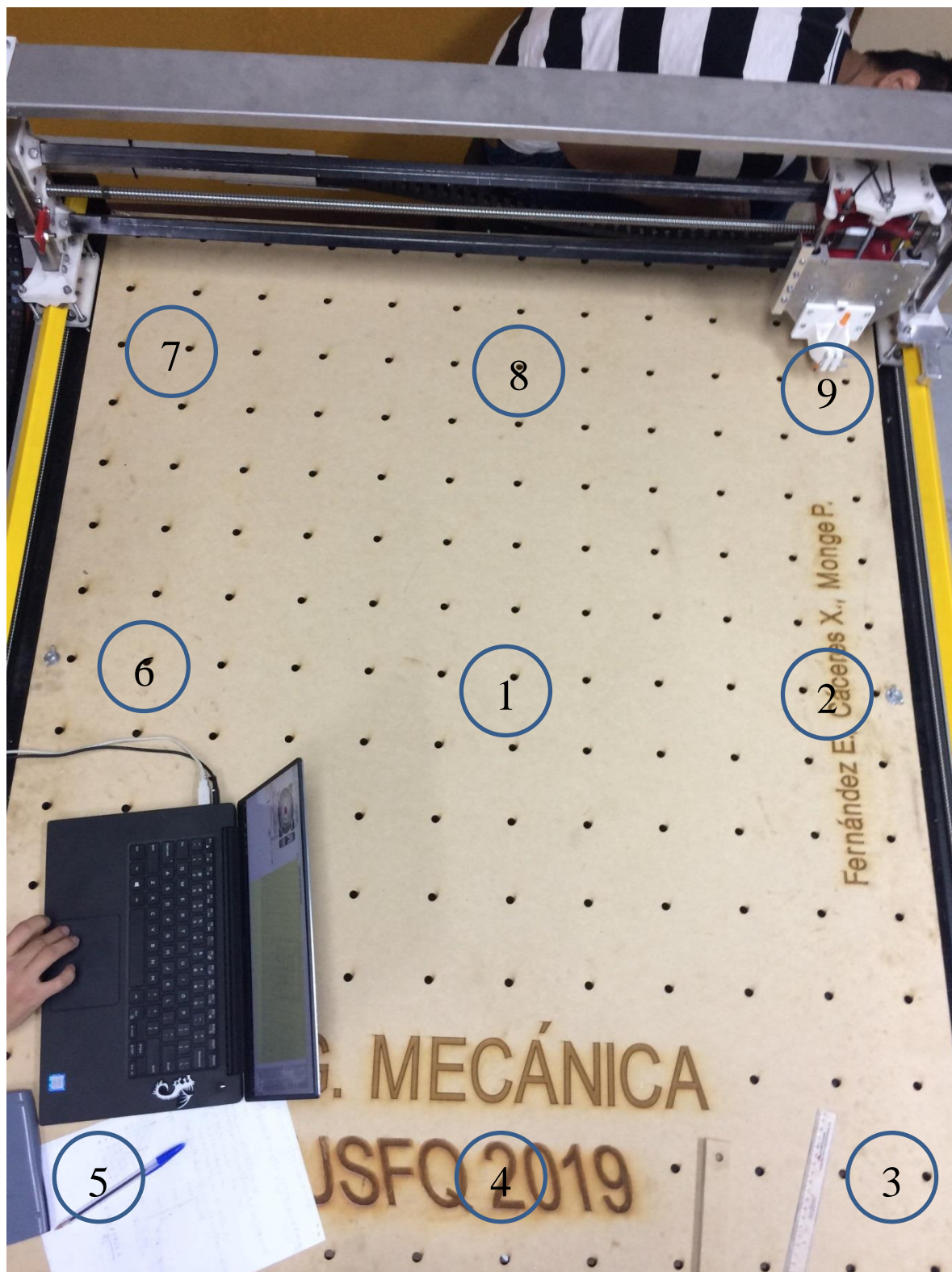


Figura 13: Diagrama de posiciones de calibración del tablero MDF.

Para desarrollar la nivelación de la mesa se parte desde el centro de la misma como punto inicial. En la posición 1 se coloca un alza de MDF de 20mm de altura por debajo del

tablero para evitar pandeo. A continuación, se procede a bajar el cabezal de la herramienta hasta que haga contacto con la madera y utilizando el comando: “G92 z0” en *PronterFace* se establece que esa sea la posición 0 en el eje vertical. De esta forma, al levantar el cabezote y llevarlo a la posición 2, se repite el procedimiento de descenso hasta que haga contacto y se realiza el ajuste del perno nivelador ubicado en la posición descrita hasta que el filo de la herramienta esté en contacto mínimo con la mesa. Una vez en esta posición, se pregunta a la máquina su posición con el comando: “M114”, que se visualiza de la siguiente forma:

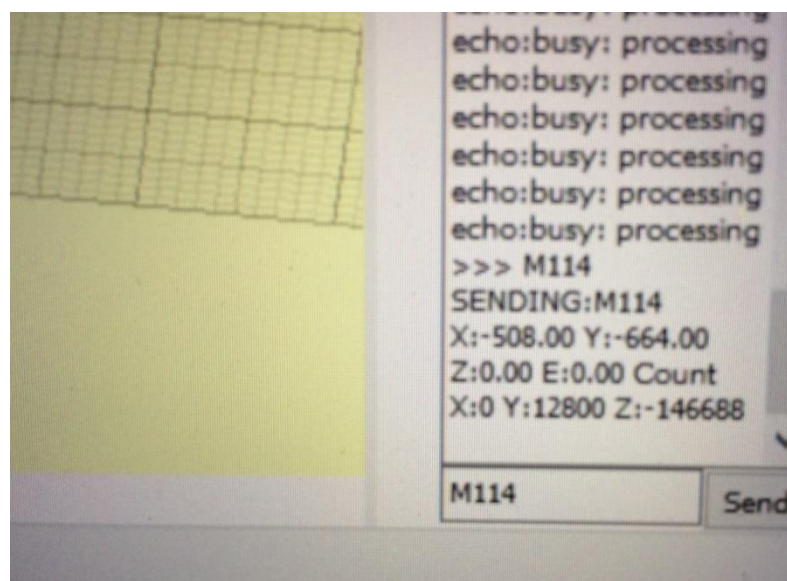


Figura 14: Interfaz de *PronterFace* al enviar el comando M114 de posición.

Tras aplicar el comando, la máquina reporta una posición de  $X=-508.00$ ;  $Y=-664.00$  y  $Z=0.00$ . Esto quiere decir que se tiene que nivelar el tablero (sea alzándolo o bajándolo) haciendo uso de los pernos niveladores, de tal manera que el tablero de MDF se encuentre en contacto con la punta de la herramienta, (que es el  $Z=0.00$  de la máquina). Se realiza el mismo procedimiento en orden por todos los nueve puntos descritos en la figura 13 y se realiza otra pasada sobre la mesa para confirmar la alineación.

## 2.-Especificaciones del diseño -términos de referencia-

Las especificaciones del diseño de la máquina establecen que existiría una deformación de 0.54mm en el punto crítico dado por la carga de 11.23kg del pórtico. En la tabla 3 se resumen las características de la Máquina CNC.

Requerimientos de diseño y fuerzas	110N de carga máx.	
Interface	Arduino Mega 2560 con careta CNC shield RAMPS V1.4	
Deformaciones máximas en punto crítico	0.54mm	
Inversión actual	\$800,31	
Dimensiones máximas	Alto	1052mm
	Ancho	1400mm
	Largo	1492mm
Materiales	Inoxidable AISI 304; Acero ASTM A-36	
Motores	Motores de paso NEMA 17	
Husillo	SFU 1605	

Tabla 3: Parámetros técnicos.



### 3.- Modo de uso de la máquina

Para usar la máquina se debe conectar el enchufe a un tomacorriente de 110V. Se verifica que no esté accionado el botón de emergencia y se gira el *switch* de encendido, esta acción debe encender la luz LED verde contiguo al interruptor. A continuación, se debe conectar el USB al computador. Para este punto se debe tener instalado *PronterFace* en el equipo.

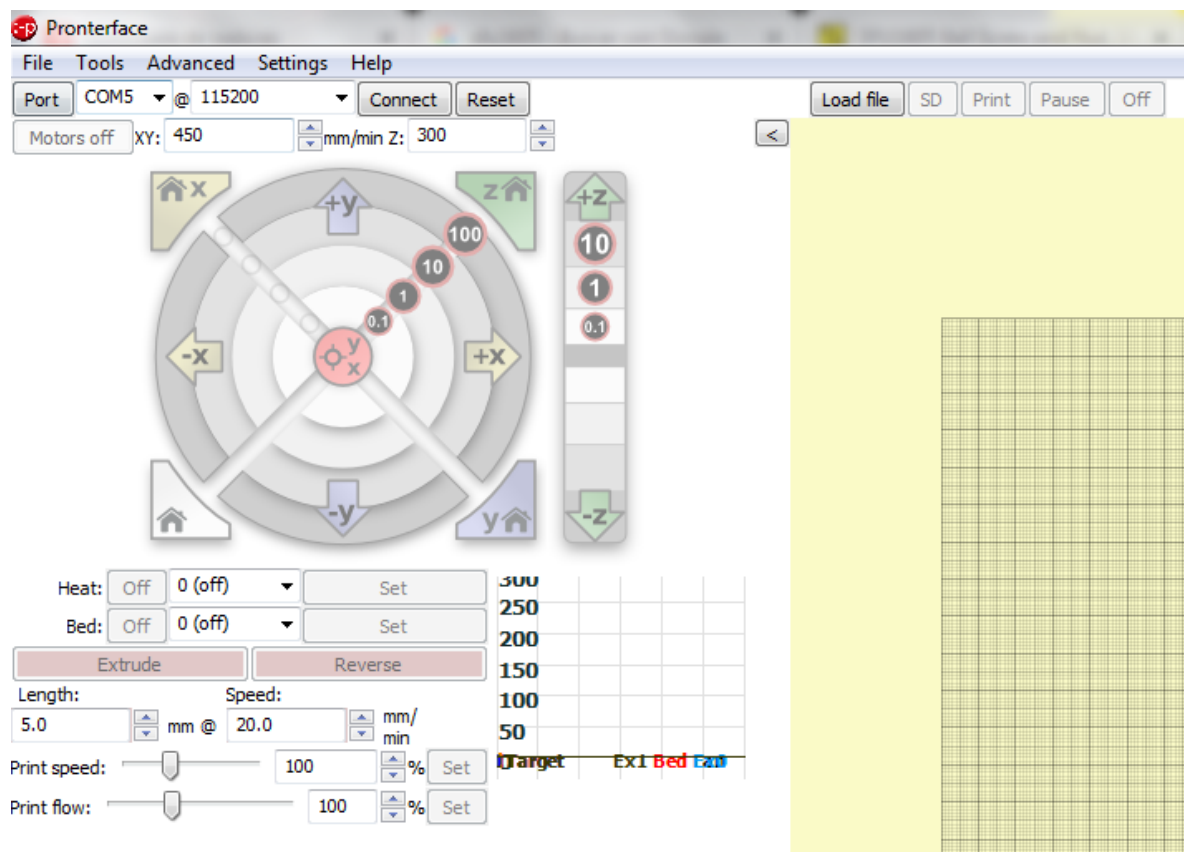


Figura 15: Interfaz de *PronterFace*.

Junto al botón *Port* se debe escribir el puerto de comunicación al que se ha conectado el USB de la máquina (*PronterFace* reconoce el puerto al que ha sido conectada la máquina si se despliega la flecha aladaña al COM). Se debe establecer una tasa de baudios de 115200 y se presiona *Connect*. Si la conexión fue exitosa, el panel de movimientos de los ejes dejará de ser grisáceo y se tornará activo. De igual manera, se desplegará la siguiente información en la columna de comunicación ubicada en la parte derecha del programa:

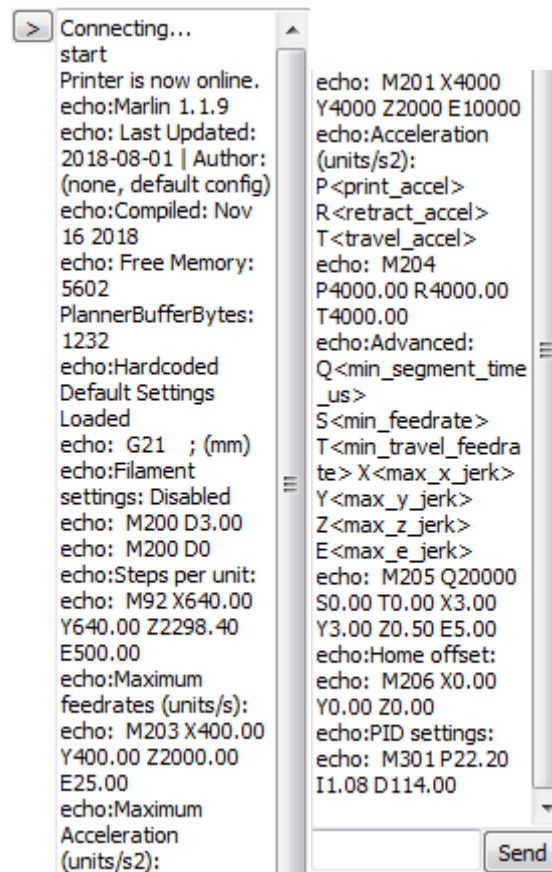


Figura 16: Mensaje de conexión exitosa entre la máquina y *PronterFace*.

Una vez realizada una conexión entre la máquina y el computador, se debe establecer que la velocidad máxima en el recuadro XY sea de 450mm/min y para el recuadro Z de 300mm/min. A continuación, se debe enviar a *HOME* con el botón ubicado en la esquina inferior izquierda del panel de control:



Figura 17: Botón *HOME* máquina de *PronterFace*.

Esta orden acciona los motores desde cualquier punto en el que se encuentre el cabezote y lo hace mover en la dirección +z; -x; -y, en ese orden, hasta que haga contacto con cada uno de los sensores inductivos. Desde la posición *HOME* máquina, se puede mover el cabezote en todas las direcciones sin temor a impacto, puesto que la máquina tiene pre establecido sus

límites de distancia para todos los ejes. A continuación, se carga el archivo de comandos de código G desde el botón *Load File*. Si se desea mover a un punto en específico se puede escribir el comando: G0 Xx Yy Zz F450 donde cada subíndice es la posición a la que desea mover el cabezote. Desde el punto origen del material que se va a maquinar, se debe escribir el comando G0 X0 Y0 Z0 (la herramienta ubicada en el Z deberá estar haciendo contacto con la materia prima). Finalmente, se enciende el motor de fresado y se aplasta el botón *Print*. De esta manera, el cabezote empieza a moverse de acuerdo con lo descrito en el código G.

#### 4.- Diagrama de flujo de proceso

En la figura 18, se realiza una representación gráfica en la que se explica el proceso de manufactura de una pieza haciendo uso de la máquina CNC de corte y grabado. Se consideran los parámetros de diseño de la pieza, montaje del material base y uso de la máquina. El diagrama de flujo de proceso expuesto es el método que se ha aplicado para la manufactura de los cuadrados que definirá el experimento con el que se determina la tolerancia de la máquina.

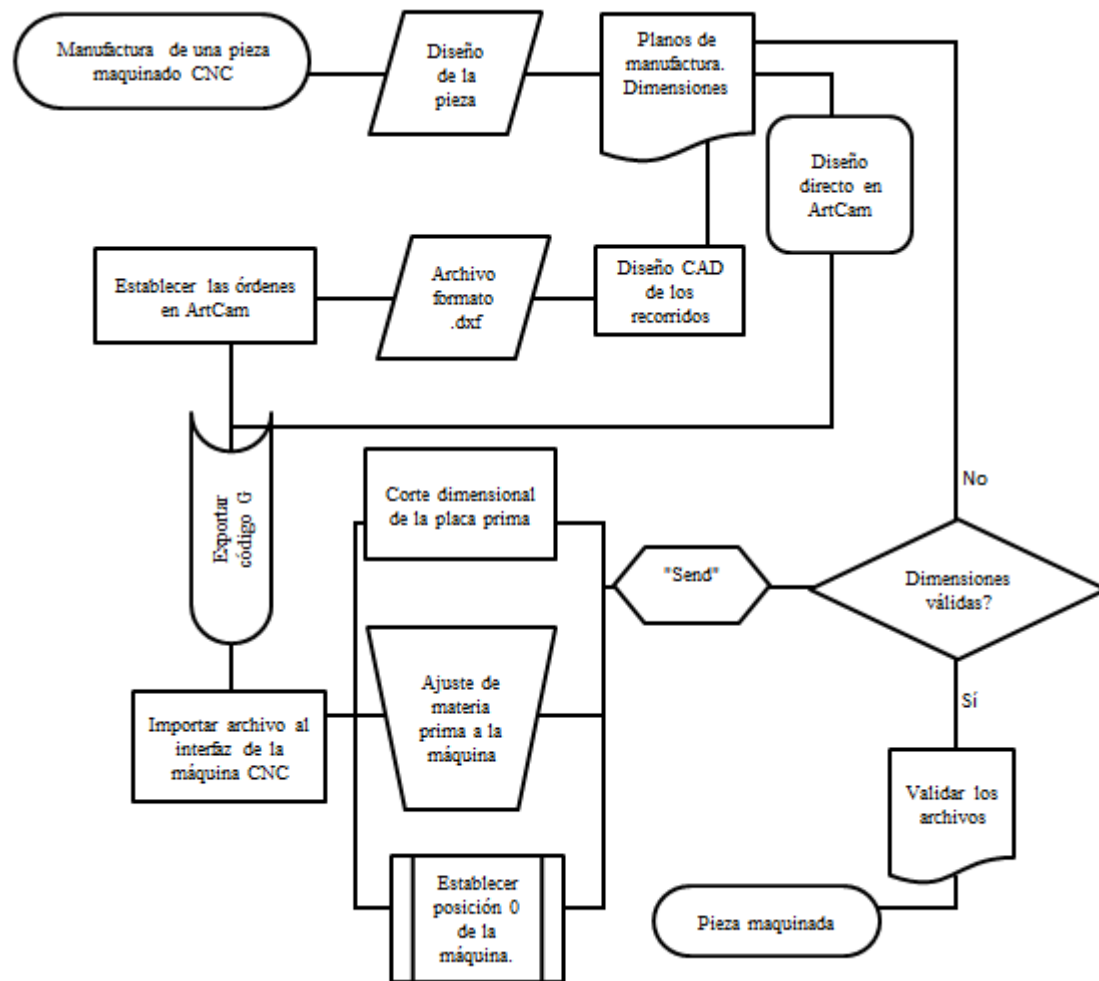


Figura 18: Diagrama de flujo para manufactura de una pieza mediante maquinado CNC.

Elaboración propia.

## 5.- Programación del experimento.

Para determinar la precisión de la máquina, se realiza un archivo de maquinado desde *ArtCam* en el cual se establece el tamaño de una plancha de 1200x500mm de MDF de 3mm de espesor, en la cual se realiza un arreglo de [3x7] cuadrados de 120x120mm cada uno y un espaciado entre ellos de 60mm en *X* y 30mm en *Y* como se visualiza en la figura 19.

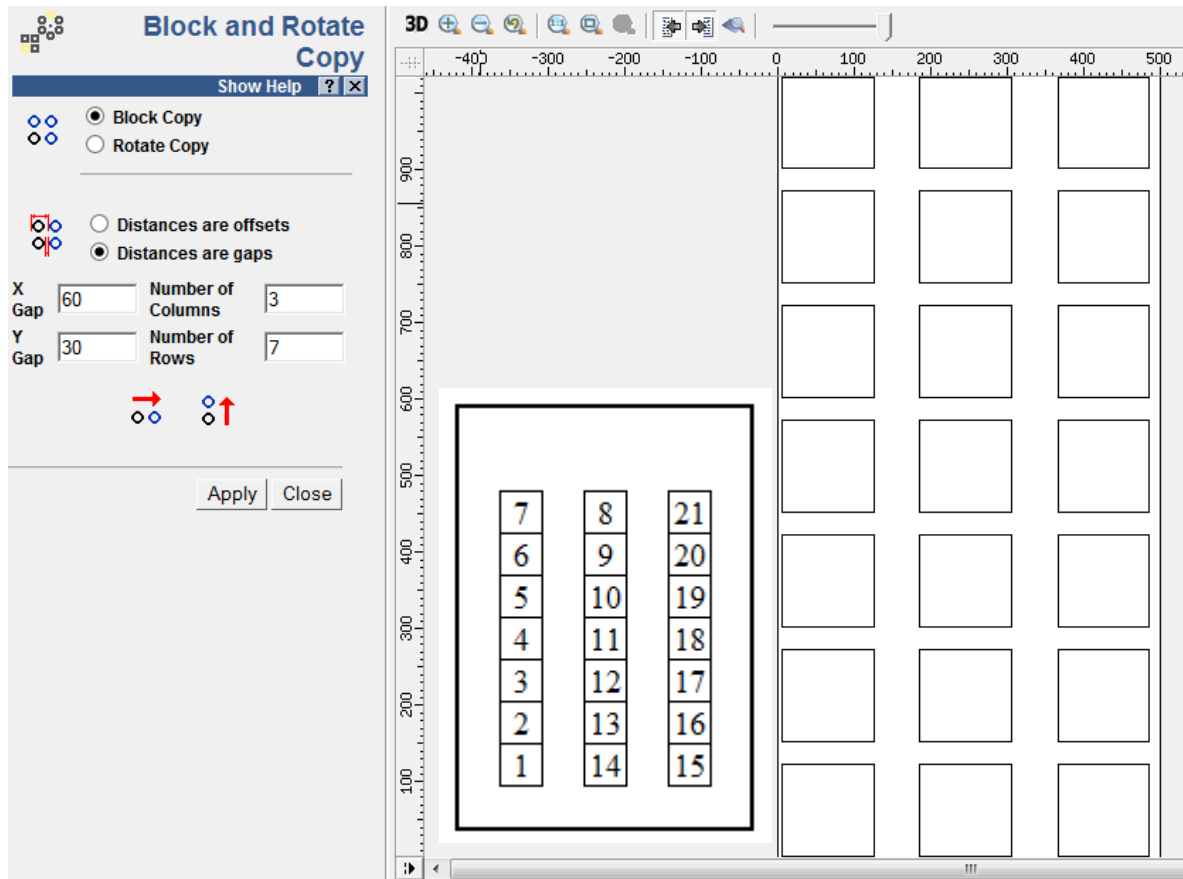


Figura 19: Arreglo de cuadrados en *ArtCam* para realizar la medición de precisión de corte, se adjunta la leyenda de la numeración de estos.

A continuación, se seleccionan los vectores y se agrega un *Toolpath* que es la orden que dictamina por dónde se moverá la herramienta. Para este experimento se utiliza la herramienta de corte y grabado tipo cónica en V, que tiene las características expuestas en la figura 20.

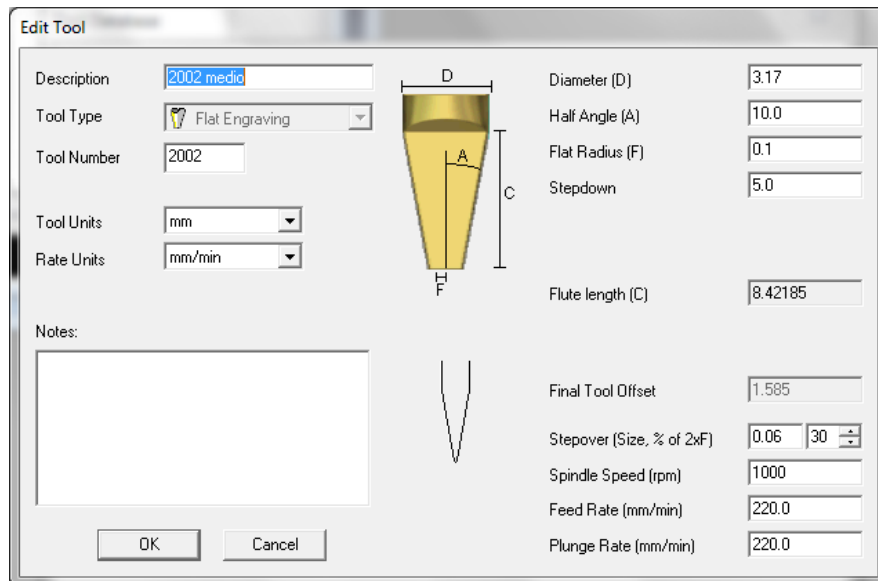


Figura 20: Parámetros de *ArtCam* para la herramienta tipo cónica en V.

Finalmente, las órdenes del *Toolpath* que viaja sobre los vectores del arreglo de cuadrados fue designado con la siguiente configuración:

- ✓ Espesor materia prima: 3mm
- ✓ Profundidad final: 3mm
- ✓ Altura Z segura para desplazamiento del cabezote: 4mm.
- ✓ Herramienta de corte: Cónica en V.
- ✓ Paso de penetración: 1mm por paso.
- ✓ Avance: 220mm/min.
- ✓ Avance vertical: 220mm/min.

Con el *Toolpath* definido, se exporta el archivo de comandos de código G en formato Mitsubishi arcs.PRГ, debido a su compatibilidad con *PronterFace*. Se importa el archivo y se corre el programa. En la figura 21, se expone la simulación de *ArtCam* que ejemplifica el resultado esperado en la plancha de MDF.

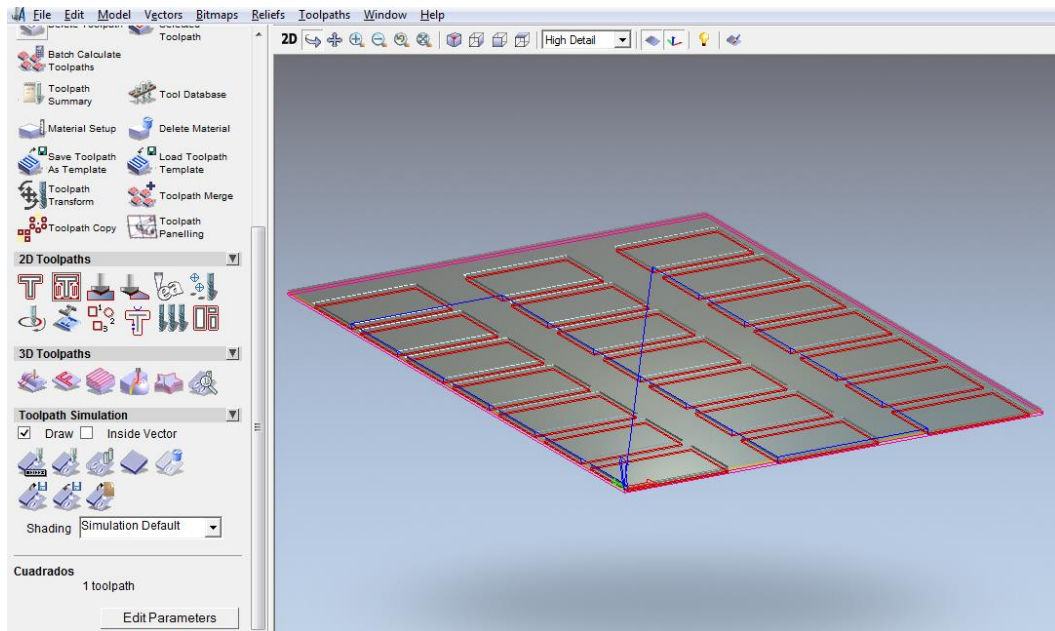


Figura 21: Resultado de la simulación para la experimentación de corte de cuadrados.

## RESULTADOS

Se realizaron cuatro iteraciones hasta que se obtuvo alineación entre los husillos de los motores del eje Y. En la tabla 4 se visualiza la medición obtenida para cada iteración. Se midió la distancia interna entre la placa que sostiene al riel y el Dolly. Se consiguió equidistancia a la cuarta iteración y a una distancia de 90,7mm.

Distancia placa y dolly		
Prueba	Dimensión	Dimensión
	[mm]	[mm]
	Lado A	Lado B*
1	89,4	90,5
2	90,2	90,8
3	91,6	90,5
4	90,7	90,7

\*Posición del sensor inductivo

Tabla 4: Resultados de las iteraciones de calibración del eje Y.

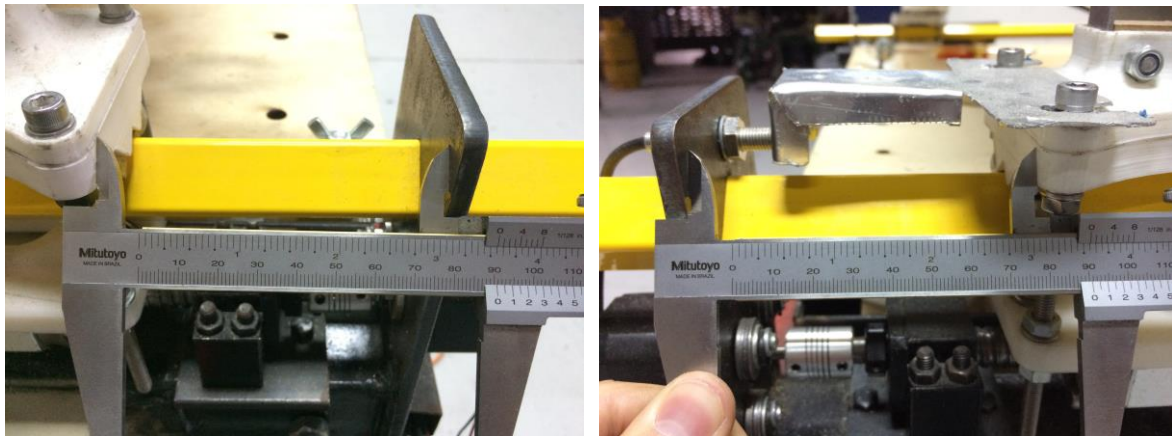


Figura 22: Calibración de distancia del eje Y. Izquierdo: Lado A. Derecho: Lado B, que contiene al sensor inductivo.

Al realizar la medición de altura del tablero de MDF, se obtuvo la tabla 5 de coordenadas en el plano de trabajo formado por el eje X y Y. Para todas estas coordenadas se realizó la calibración para  $Z=0$ . Para exponer los resultados se hace uso de las posiciones expuestas en la figura 13.



Tabla de posición de calibración Z=0		
Punto 1-9	Coordenadas	
	X	Y
5*	0	0
1	510	677
2	1000	667
3	1000	0
4	510	0
6	0	677
7	0	1227
8	510	1227
9	1000	1227

\*Origen de la máquina

Tabla 5: Coordenadas de posición para la calibración de la altura del tablero de MDF.

Posiciones en las que se niveló a Z=0.

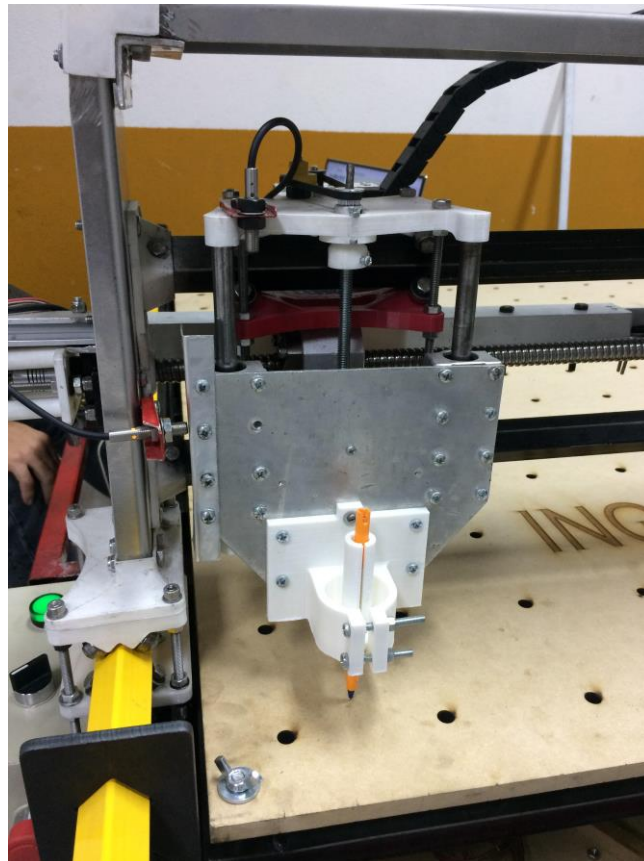


Figura 23: Origen de la máquina en X=0, Y=0 para la posición 5.

La velocidad experimental se obtuvo en el maquinado de los cuadrados mediante la medición del tiempo que le toma en realizar cada lado. La tabla 6 resume las mediciones de velocidad obtenidas dada una distancia conocida de 120mm.

Parámetro	1	2	3	4	5
t [s]	34,5	33,5	33,4	33,7	33,3
d [mm]	120	120	120	120	120
v [mm/s]	3,5	3,6	3,6	3,6	3,6
v [mm/min]	209,0	214,9	215,4	213,8	216,1

Tabla 6: Velocidad obtenida con la medición del tiempo y una distancia conocida.

El experimento de corte de cuadrados se demuestra en las figuras 24 y los resultados son expuestos mediante la tabla 7 y la figura 25, correspondiente a la gráfica de los resultados. Se realizaron 21 cortes en tres columnas equidistantes en MDF de 3mm de espesor.

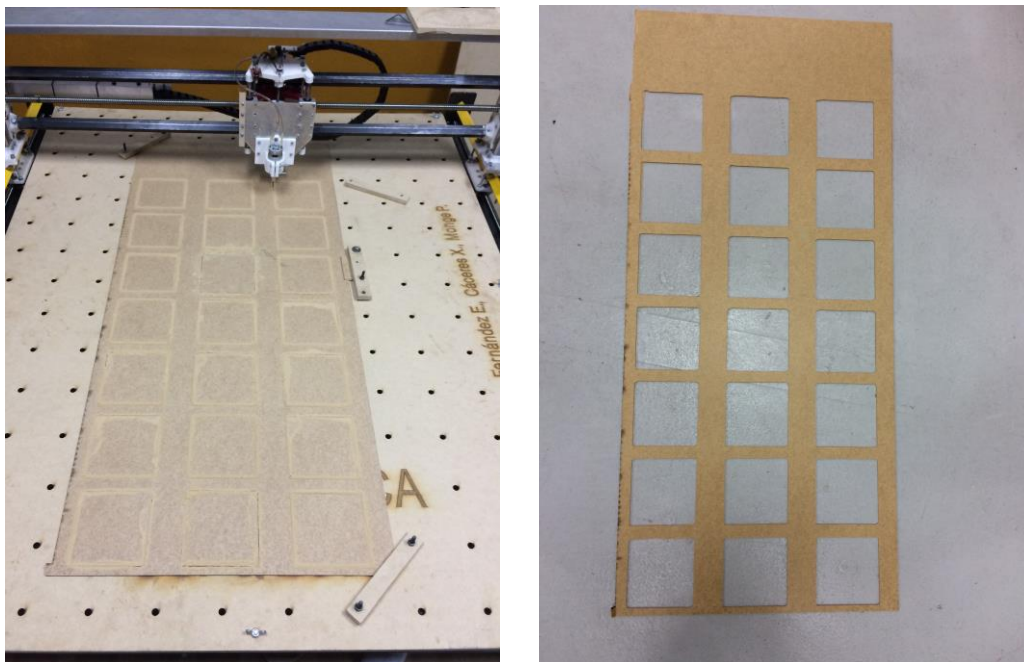


Figura 24: Resultados de corte sobre MDF.

Por lo tanto, las mediciones de los cuadrados internos se resumen en la tabla 7 y se encontró un promedio de medida en el eje X de 125.0 y el eje Y de 126.8.

## Medición cuadrados internos

Designación	Dist. $X$	Dist. $Y$
1	124,9	126,5
2	125,0	126,8
3	125,3	127,1
4	125,3	127,0
5	125,2	126,7
6	124,9	126,0
7	124,4	125,9
8	124,4	126,6
9	125,6	126,2
10	125,3	127,5
11	125,9	127,5
12	125,2	127,1
13	124,9	126,6
14	124,9	126,3
15	124,6	126,3
16	124,7	127,1
17	125,3	127,5
18	125,2	127,1
19	125,1	127,0
20	124,5	126,6
21	124,9	126,9
Promedio	125,0	126,8

Tabla 7: Resultados para medición de cuadrados internos de la prueba de corte.

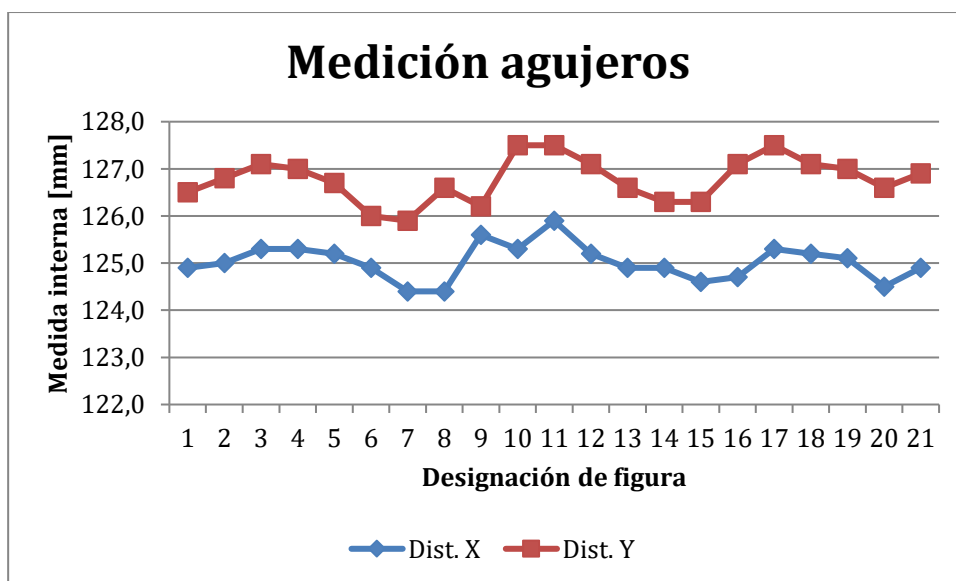


Figura 25: Resultados de medición de los agujeros.

Finalmente, se realizaron cortes artísticos de grabado sobre MDF y madera balsa para demostrar la funcionalidad de la máquina. Los resultados obtenidos de acabado y capacidad de grabado se muestran en la figura 26.



Figura 26: Grabado sobre MDF y balsa realizado con la máquina CNC.

## DISCUSIÓN

Una vez que se encontró que la alineación de los tornillos del eje *Y* fue correcta, se procedió a nivelar la máquina en los nueve puntos sobre el tablero. Dado que la nivelación de la mesa fue localizada en aquellos puntos, se pudo haber generado pandeo sobre la superficie de la mesa que no se encontraba cercana a cualquiera de ellos. Este fenómeno se pudo verificar sobre todo en la facilidad con la que se desprendieron los cuadrados de la prueba de corte: los cuadrados 1, 2, 4, 5, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 18, 19, 20 se desprendieron con facilidad, mientras que aquellos ubicados en el área descrita no se desprendieron de inmediato y tuvieron que ser extraídos manualmente.

Por otra parte, se encontró que el portaherramientas (incluido el *Z plate* de aluminio) producía cabeceo mientras realizaba el trabajo de corte, especialmente en el segundo paso del movimiento -*Y*. El cabeceo generó marcas en forma de diente en la mayoría de las piezas a lo largo de este trayecto, lo que produjo baja calidad del corte. Eventualmente, la flexión producida a lo largo del eje del motor dado por el avance de la herramienta podrá generar fatiga y eventual falla. Este defecto puede ser mitigado desde dos puntos: en primer lugar, se deberá disminuir la velocidad de avance de la máquina a un punto en el que sea compatible con las revoluciones del motor; en segundo lugar, se deberá rediseñar el portaherramientas y el *Z plate* debido a que no ofrecen suficiente robustez para soportar el avance de la herramienta al realizar el corte. Sin embargo, cuando la herramienta realizó grabado a 1mm de profundidad (expuestos en la figura 26), el defecto no se pronunció drásticamente. Finalmente, el motor usado para esta fase del proyecto presentó bajo desempeño para el trabajo propuesto dado que su desempeño óptimo se encontraba a 24V y se utilizó su fase a 12V.

Al realizar las mediciones se encontró que la dimensión en el eje *X* tiende a 125,0mm; mientras que la dimensión del eje *Y* tiende a 126,8mm. Dado que la orden de trabajo fue la de

realizar cuadrados de 120x120mm, se determina que la exactitud de la máquina no corresponde a lo ordenado desde el software *ArtCam*. Sin embargo, la medición de 125mm y de 127mm a lo largo de todos los cuadrados, además de las separaciones entre las columnas y filas, se mantuvo constante sobre toda la plancha. Esto quiere decir que no hubo pérdida de pasos, y no hay problemas de precisión. Por lo tanto, se discute la comunicación generada entre el software *ArtCam* a *PronterFace* mediante el formato de código G usado.

*PronterFace* demostró dificultades para leer los distintos formatos exportados desde *ArtCam* 2008. Por lo tanto, se iteró con todos los formatos disponibles hasta encontrar que el único formato compatible fue Mitsubishi Arcs (inch).PRG. Por ende, la pobre comunicación entre *ArtCam* 2008 y *PronterFace* pudo haber sido el factor que generó sobredimensionamiento del corte.

Para futuras aplicaciones, se propone la repetición del ensayo de corte tras realizar las siguientes consideraciones: rediseño de la pieza “*Z plate*” para obtener una disposición más robusta al momento de cortar. De igual manera, se debe rediseñar dicha pieza para que dé cabida a un motor de fresado de mayor capacidad de corte (revoluciones y potencia). Por otra parte, se deberá considerar que las cargas previstas aumentarían con otro motor de fresado. Por último, considerar el uso de un paquete de software y hardware (como MACH3) que estén diseñados para este tipo de aplicaciones. La aplicación de software especializado permitiría la instalación de motores de mayor potencia.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó el diseño y la construcción de una máquina CNC de corte y grabado bajo las especificaciones de diseño. Este sistema servirá como una herramienta de enseñanza para las futuras generaciones de ingenieros mecánicos de la Universidad San Francisco de Quito. Dada su facilidad de uso y su precisión, la máquina puede ser usada para realizar cortes y grabado en madera balsa y MDF. Es imperativo destacar que en la industria se hace uso de maquinaria CNC por sus beneficios directos en la productividad. De esta manera, la construcción de este tipo de maquinaria a bajo costo genera la posibilidad de competir en el mercado.

Se encontró que el desempeño de los motores NEMA17, bajo la configuración de carga dada, fue dado por una velocidad máxima de 400mm/min. Debido a la instalación de un ventilador de enfriamiento, no se presentó sobrecalentamiento de los drivers de los motores. Por otra parte, no se presentó desfase del pórtico a lo largo del eje *Y* al usar la conexión compartida de los motores.

Los parámetros de impresión usados en las piezas 3d resultaron apropiados para el diseño de ellas. Sin embargo, los codos ubicados en las esquinas del pórtico sufrieron golpes que generaron fisuras. Debido a la carga del perfil que cruza a lo ancho del pórtico, se recomienda rediseñar esta pieza con un *infill* mayor a 25%.

Es imperativo mencionar la compatibilidad del formato Mitsubishi.PRG con *PronterFace*. Se ha encontrado que versiones más actuales de *ArtCam* poseen más formatos compatibles, por lo que se realizarán pruebas para determinar si el fallo dimensional dado en este estudio fue producto de un problema en la comunicación.

De igual manera, a pesar de que la baja velocidad de los motores NEMA17 suplió los requerimientos de este proyecto, se realizará una mejora al sistema de movimiento debido a que, actualmente, la velocidad máxima obtenida no es significativa. Esto será mejorado mediante la instalación de motores NEMA23 (con sus respectivos *drivers*) o a través de la

instalación de puentes H que soporten más corriente. Finalmente, se realizarán adecuaciones para realizar corte con otras herramientas, se montará un porta herramientas más robusto y se confirmarán los cálculos de diseño.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amanullah, A. N. M., Murshiduzzaman, Saleh, T., & Khan, R. (2017). Design and Development of a Hybrid Machine Combining Rapid Prototyping and CNC Milling Operation. *Procedia Engineering*, 184, 163–170.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.081>
- Ambrizal, N. H. B., Farooqi, A., Alsultan, O. I., & Yusoff, N. Bin. (2017). Design and Development of CNC Robotic Machine Integrate-able with Nd-Yag Laser Device. *Procedia Engineering*, 184, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.079>
- Beer et al. (2012) *Mecanica de Materiales*. Mc Graw Hill. 6th Edition. Appendix B: Typical Properties of Selected Materials used in Engineering
- Bodor.com (s.f.) *Bodor Genius. Cabezal Laser de Enfoque Automatico*. Recuperado el 18 de mayo de 2018 desde <http://es.bodor.com/laserhead.html>
- BricoGeek.com (s.f.) *Bobina de Cable PLA 3mm 1 Kg*. Recuperado el 18 de mayo de 2018 desde <http://tienda.bricogeek.com/descatalogado/551-bobina-cable-pla-3mm-1-kg.html>
- BricoGeek.com (s.f.) *Motor Paso a Paso NEMA 17*. Recuperado el 18 de mayo de 2018 desde <http://tienda.bricogeek.com/descatalogado/551-bobina-cable-pla-3mm-1-kg.html>
- BricoGeek.com (s.f.) *Motor Paso a Paso NEMA 23*. Recuperado el 18 de mayo de 2018 desde <http://tienda.bricogeek.com/descatalogado/551-bobina-cable-pla-3mm-1-kg.html>
- Budinas, R. & Nisbett, J. (2011) *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Mc Graw Hill. 9<sup>th</sup> Edition. Chapter 11 Rolling Contact Bearings.
- Durkovic, M., Mladenovic, G., Tanovic, L., & Danon, G. (2018). Impact of feed rate, milling depth and tool rake angle in peripheral milling of oak wood, 20(1), 25–34.  
<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005001301>

HCHbearing.com (s.f.) *60 Series Bearings Parameters*. Recuperado el 18 de mayo de 2018 desde <http://www.hchbearing.com/ProCateDetail.aspx?cid=501&cdid=2>

Koc, K. H., Erdinler, E. S., Hazir, E., & Öztürk, E. (2017). Effect of CNC application parameters on wooden surface quality. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 107, 12–18.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.001>

Nas, E. G. Samtas, H. Demir- (2012) Mathematical modelling of parameters effecting surface roughness via CNC routers, *J. Eng. Sci.*, 18, 47-59

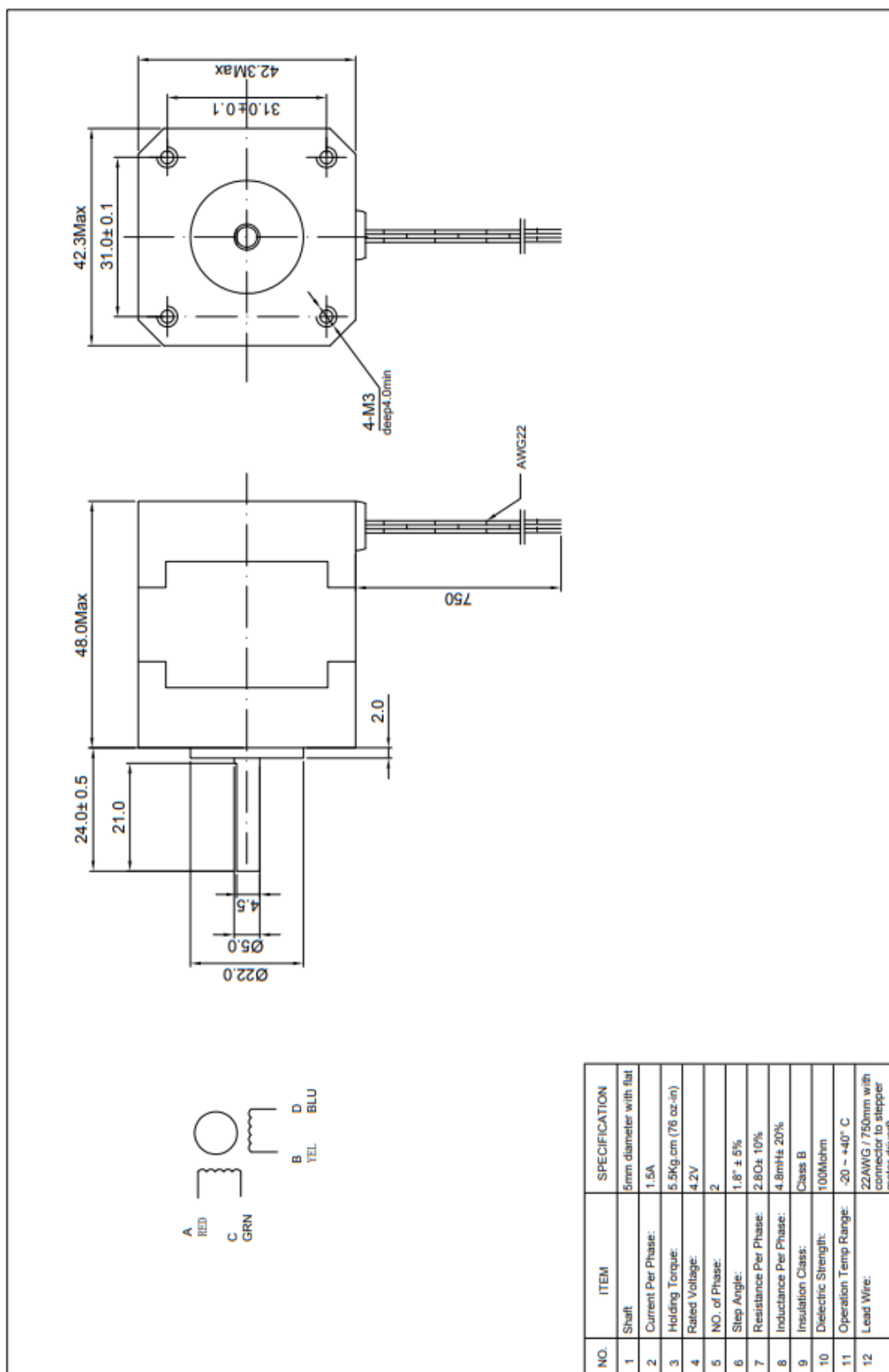
RoMaker (2017) *R-CNC, the new cheap printable CNC milling machine*. Creative Commons Attribution license. Recuperado el 18 de mayo de 2018 desde <https://www.thingiverse.com/thing:2159840>

Schweder, J. (2014) *Engineers Split on Motor Oversizing*. Automation World. Recuperado el 18 de mayo de 2018 desde <https://www.automationworld.com/article/technologies/motors/engineers-split-motor-oversizing>

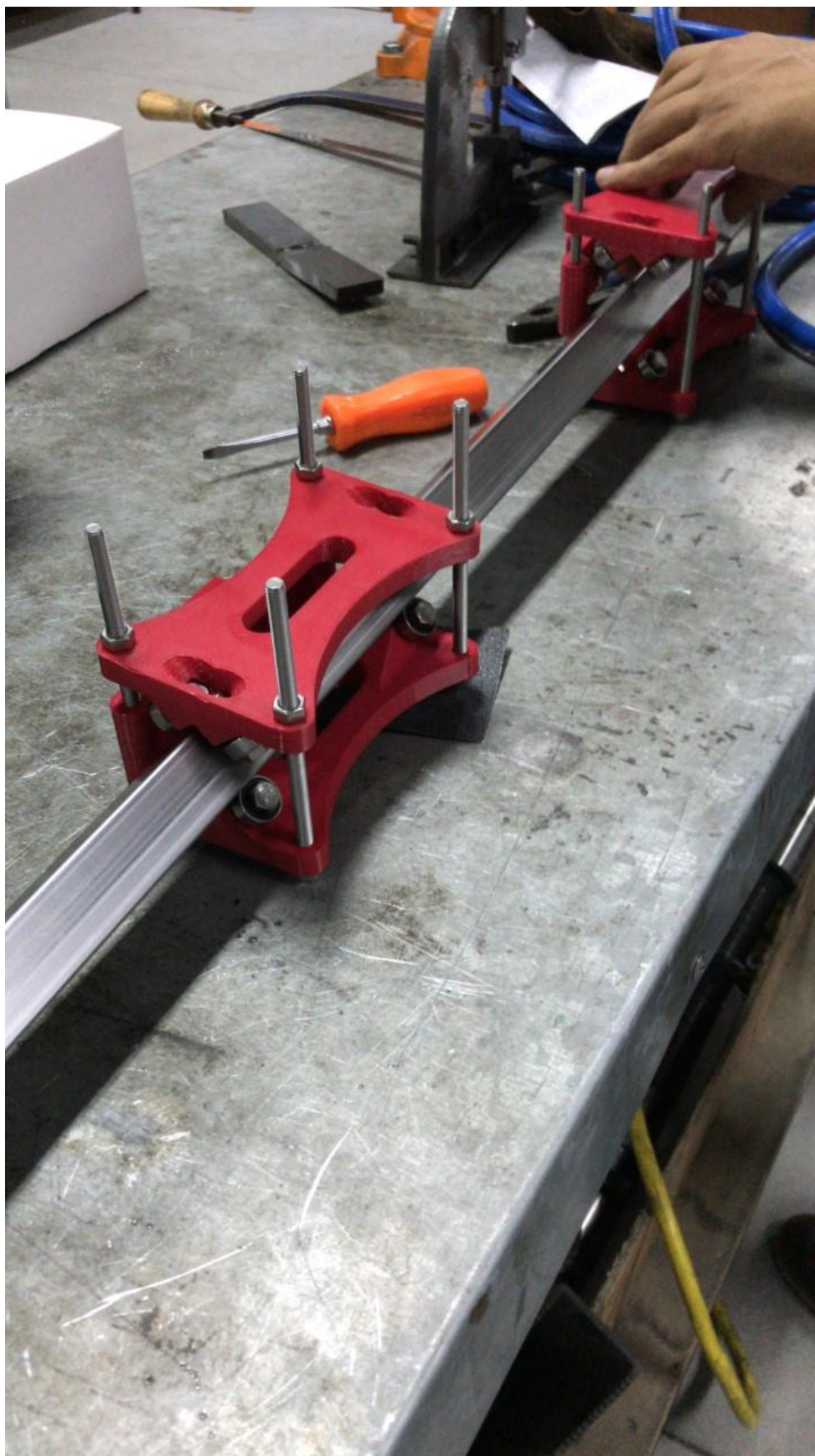
SKF (2016) *Rolling Bearings*. Page 70 Table 2. Recuperado el 18 de mayo de 2018 desde <http://www.skf.com/binary/77-121486/SKF-rolling-bearings-catalogue.pdf>

Thermal Dynamics (2004) *Cutmaster 101 Air Plasma Cutting System*. Recuperado el 18 de mayo de 2018 desde [https://www.westermans.com/downloads/thermal\\_bro\\_cutmaster\\_101eng.pdf](https://www.westermans.com/downloads/thermal_bro_cutmaster_101eng.pdf)

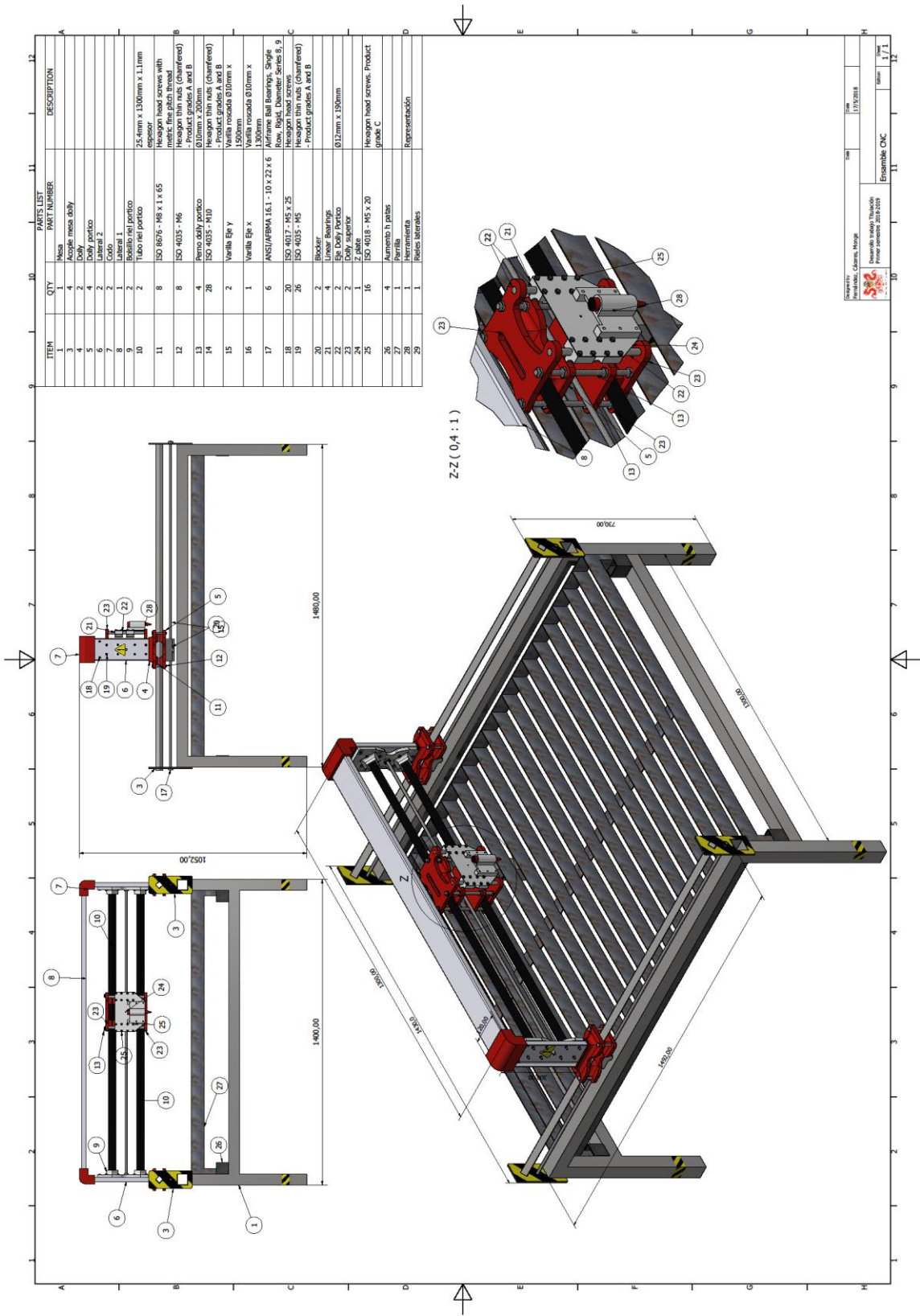
Underwood, N. (2011) *RepRap Arduino Mega Pololu Shield 1.4*. Recuperado el 14 de julio del 2018 desde [https://reprap.org/wiki/RAMPS\\_1.4](https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4)



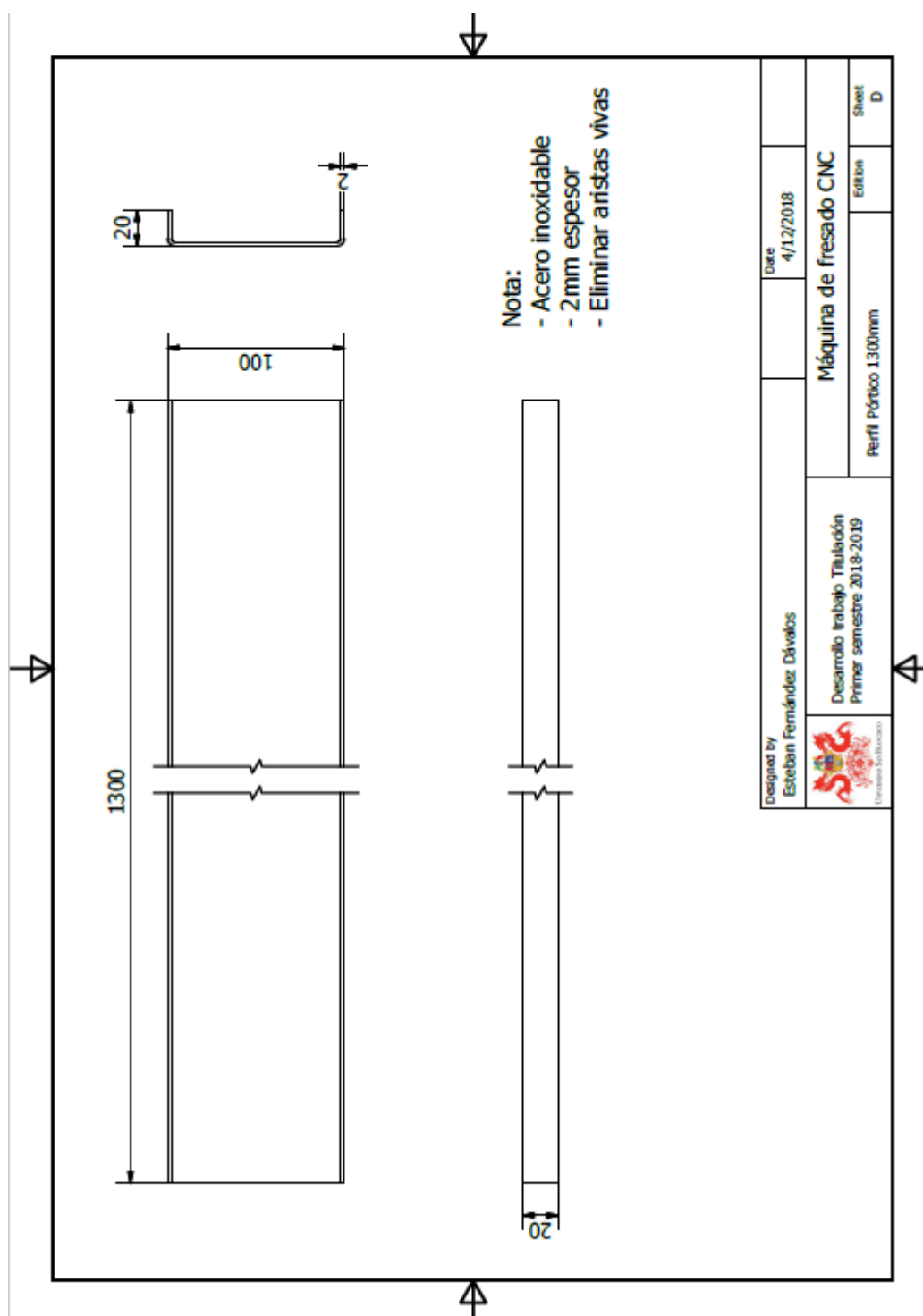
## ANEXO B: INSTALACIÓN DOLLY.



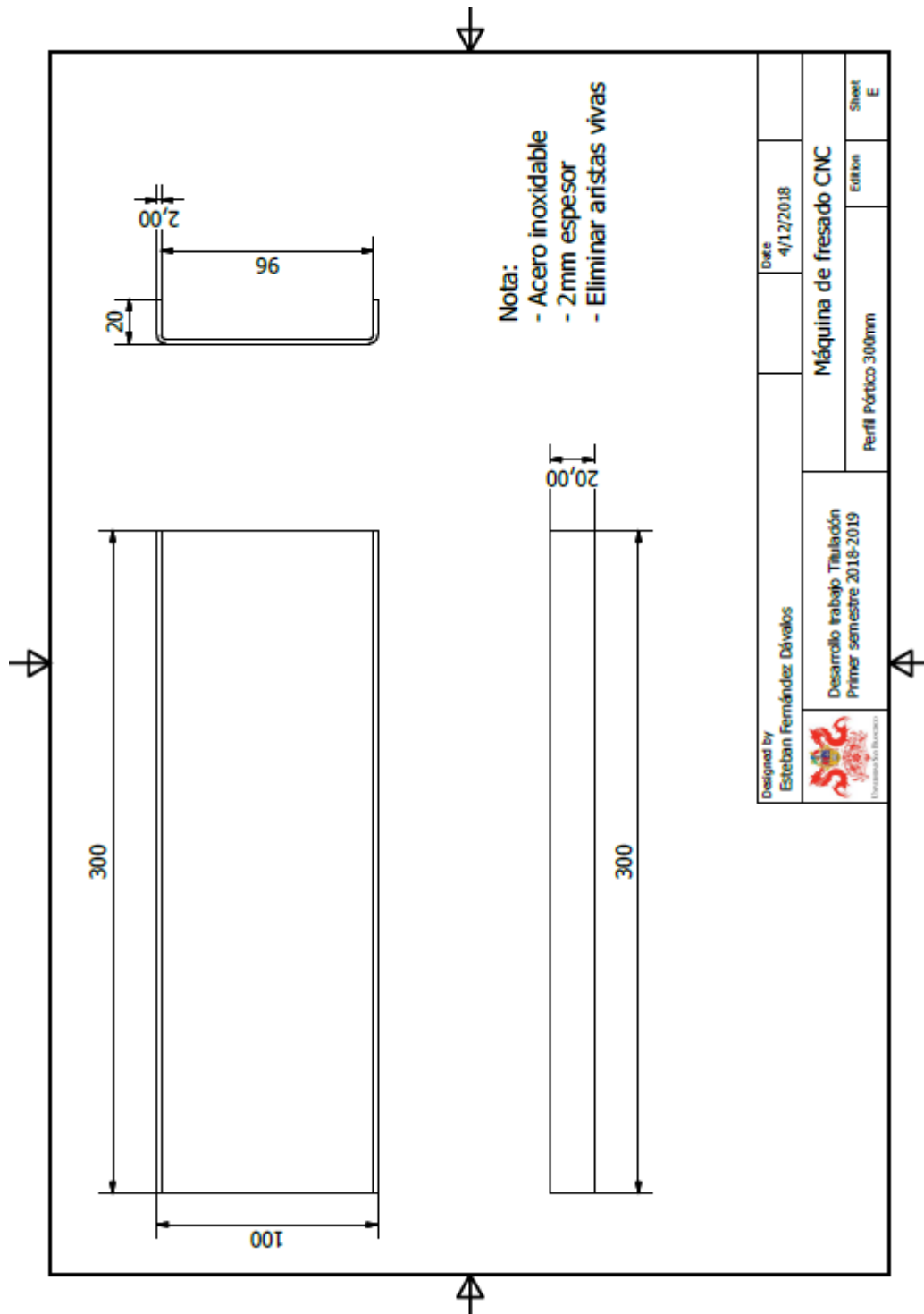
ANEXO C: PLANO GENERAL.



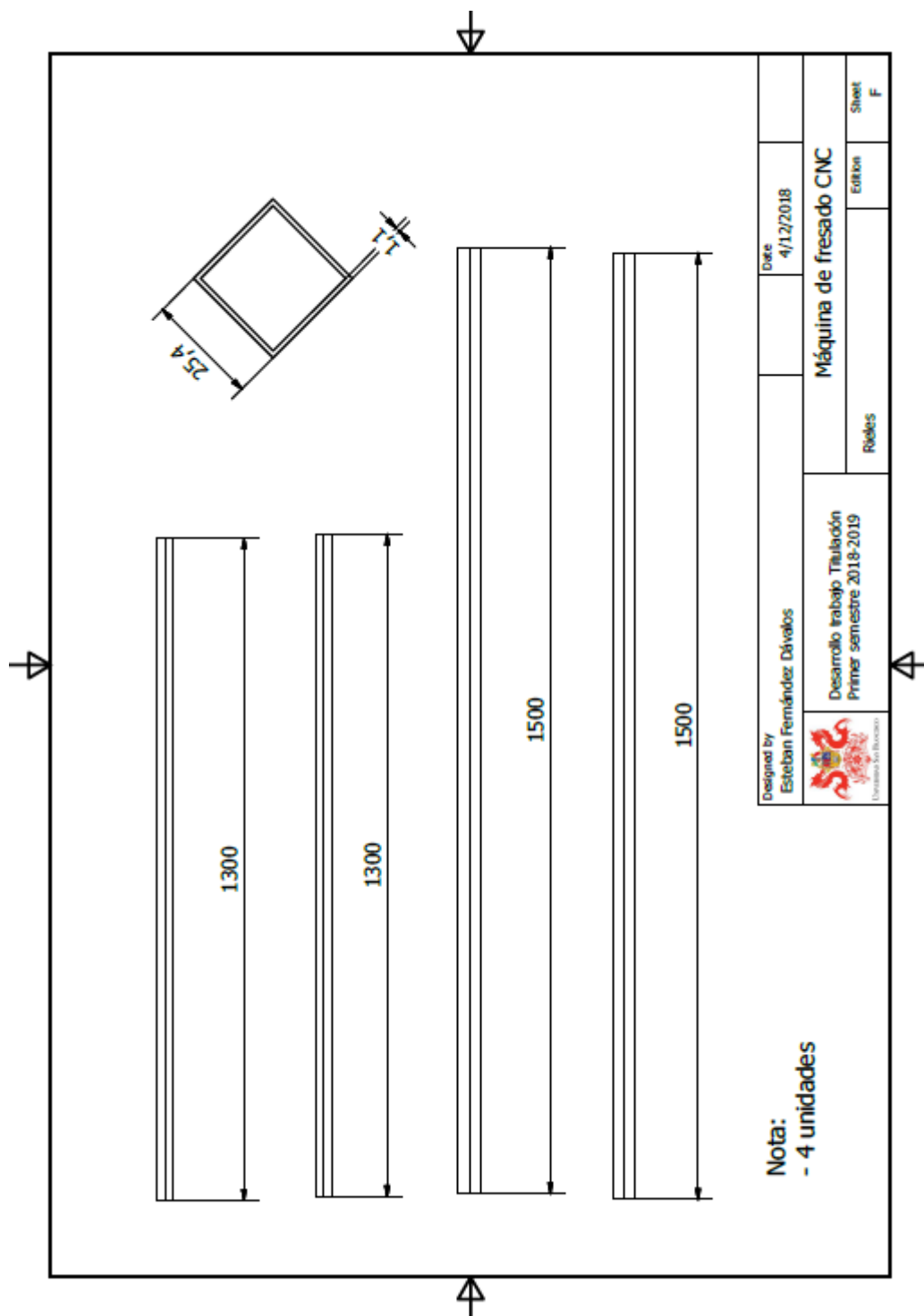
## ANEXO D: PERFIL PÓRTICO 1300MM.



## ANEXO E: PLANO PERFIL PÓRTICO 300MM.

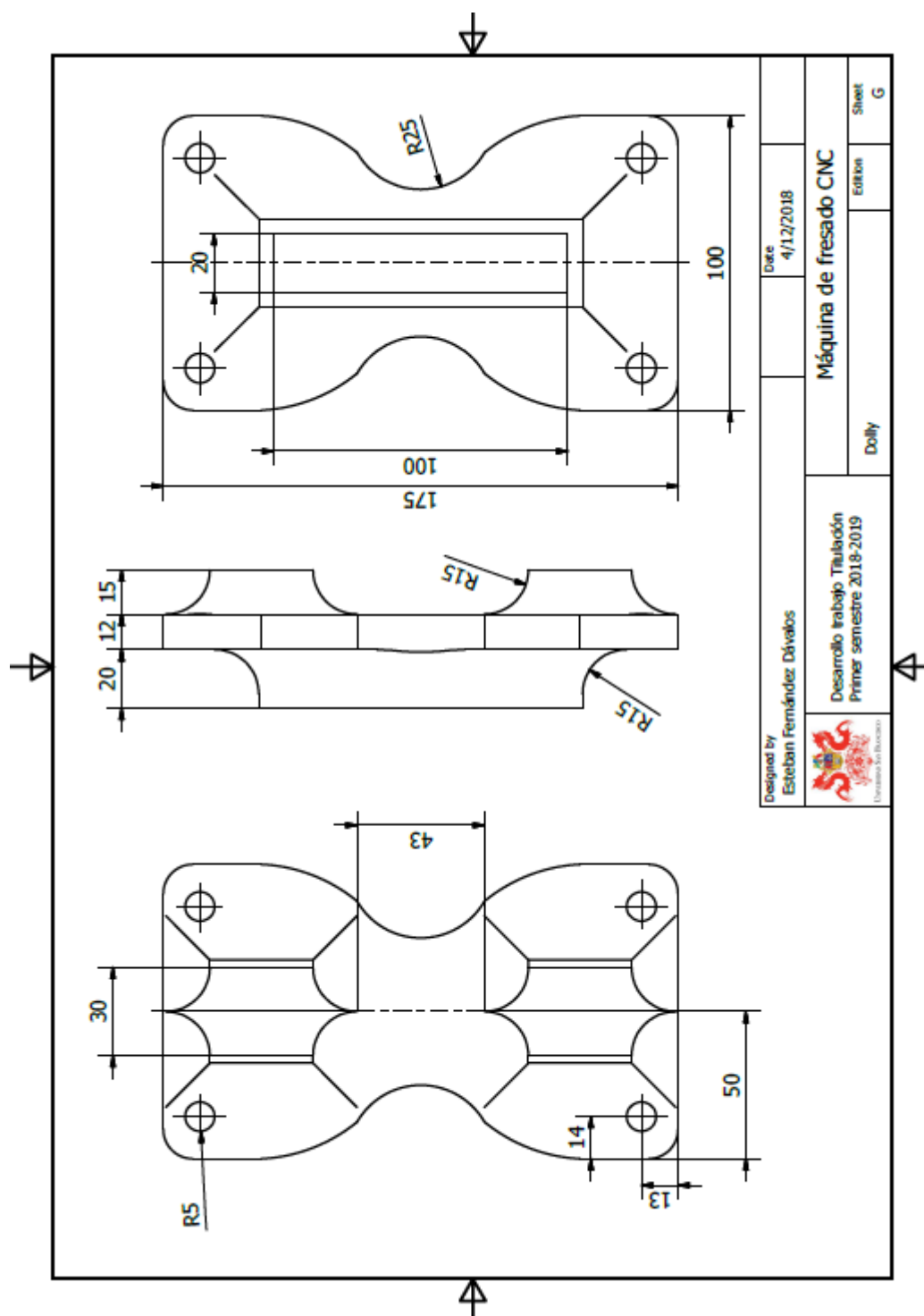


## ANEXO F: PLANO RIELES EJE X, Y.

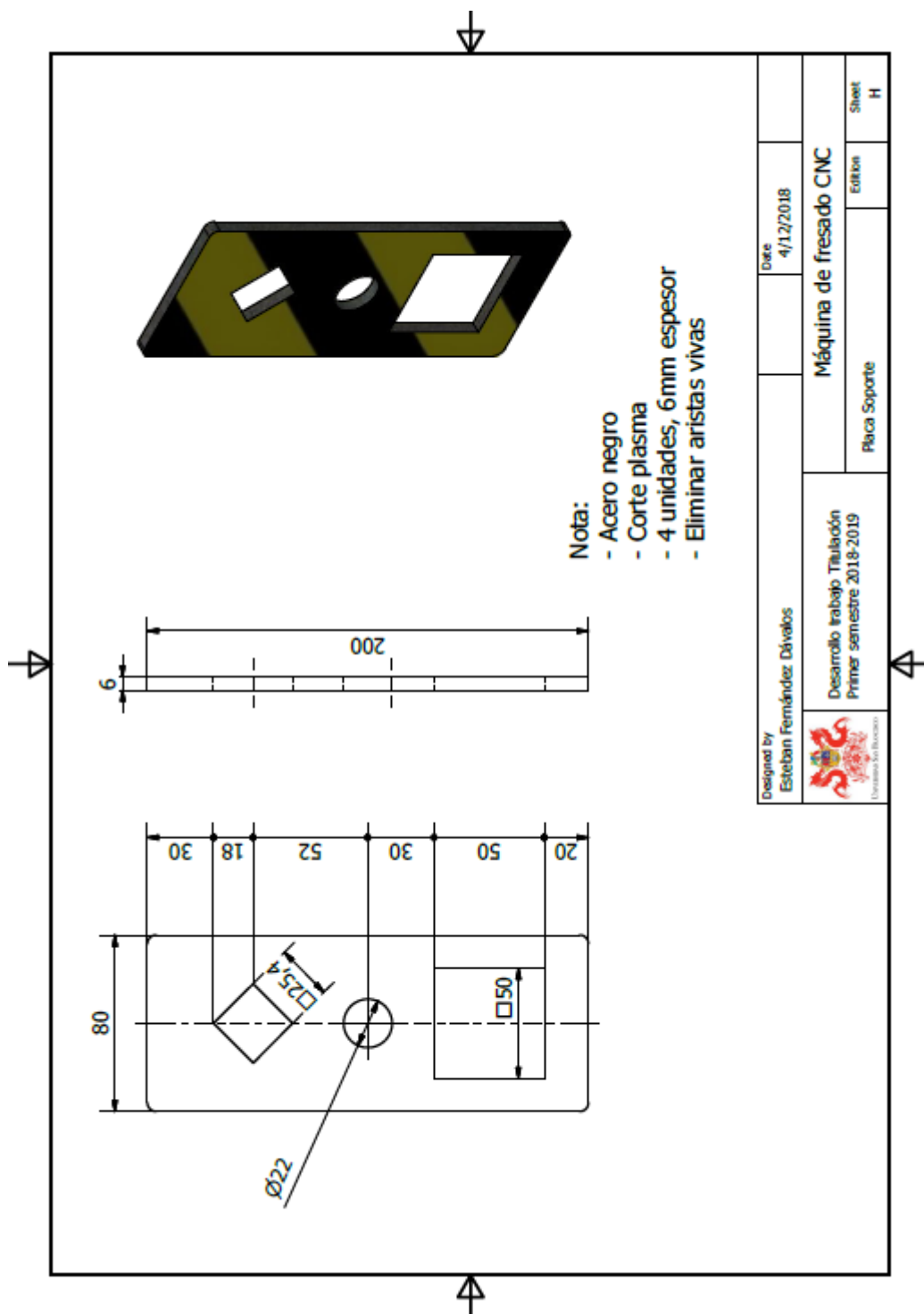




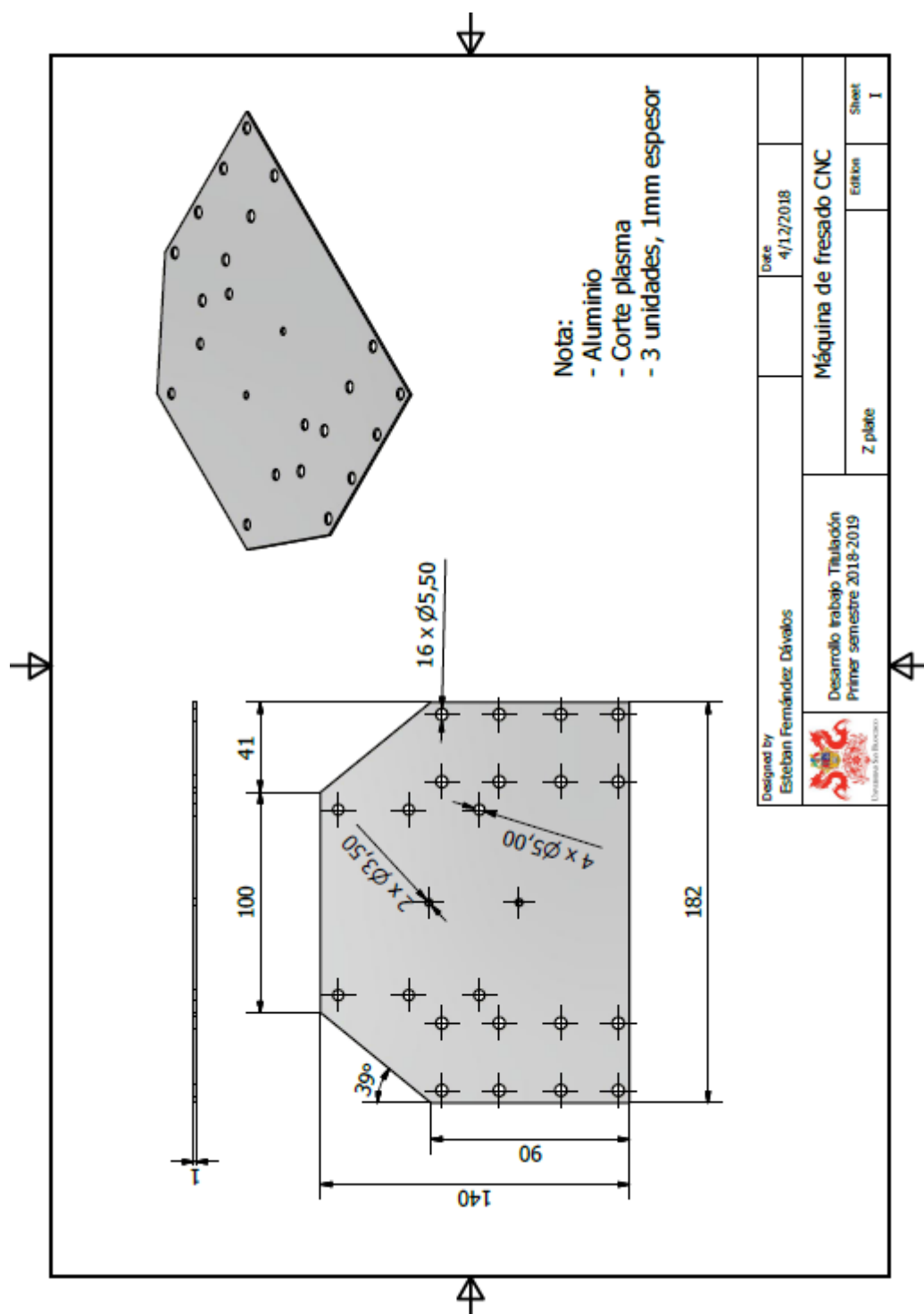
## ANEXO G: PLANO DOLLY.



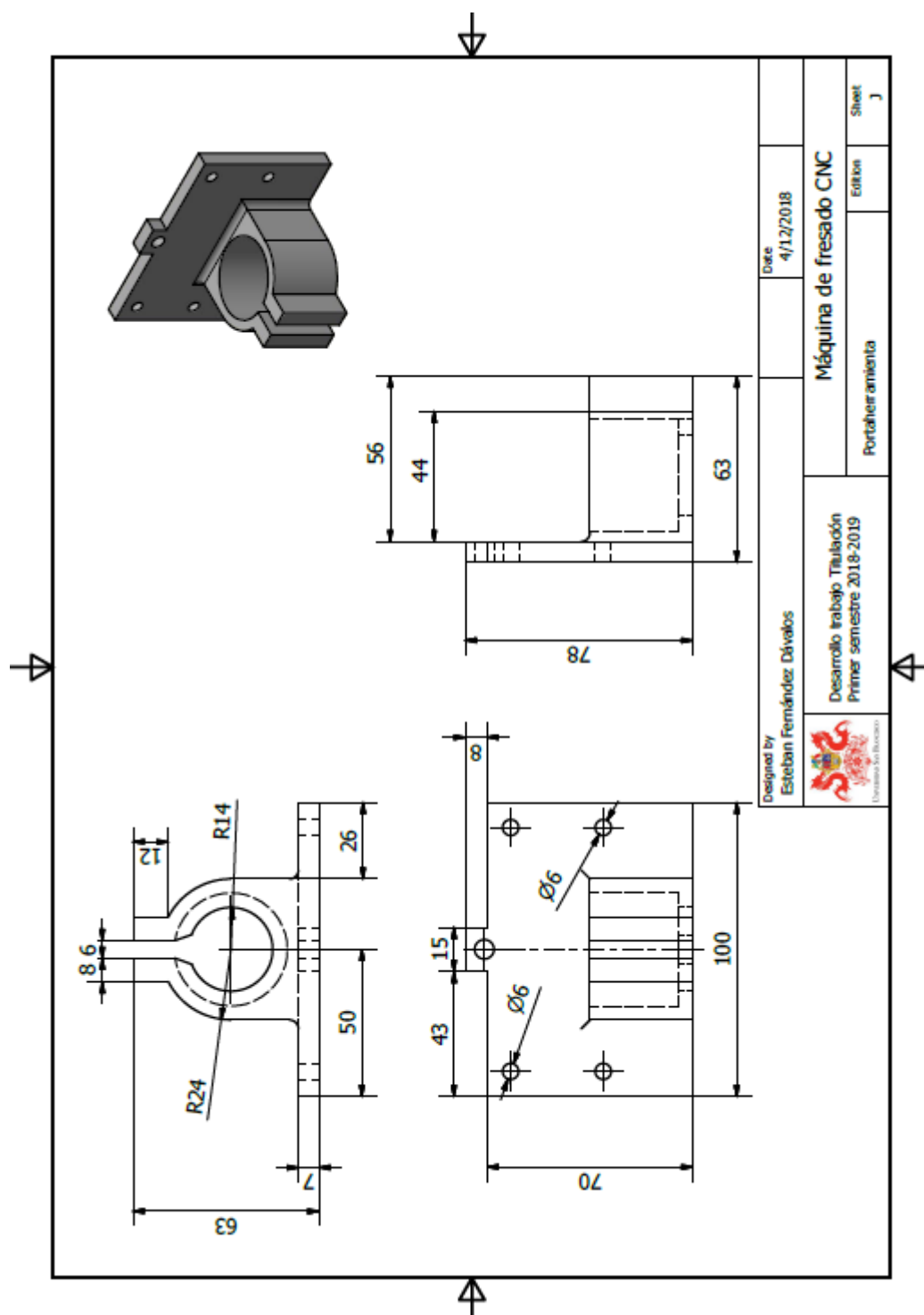
## ANEXO H: PLANO PLACA SOPORTE.



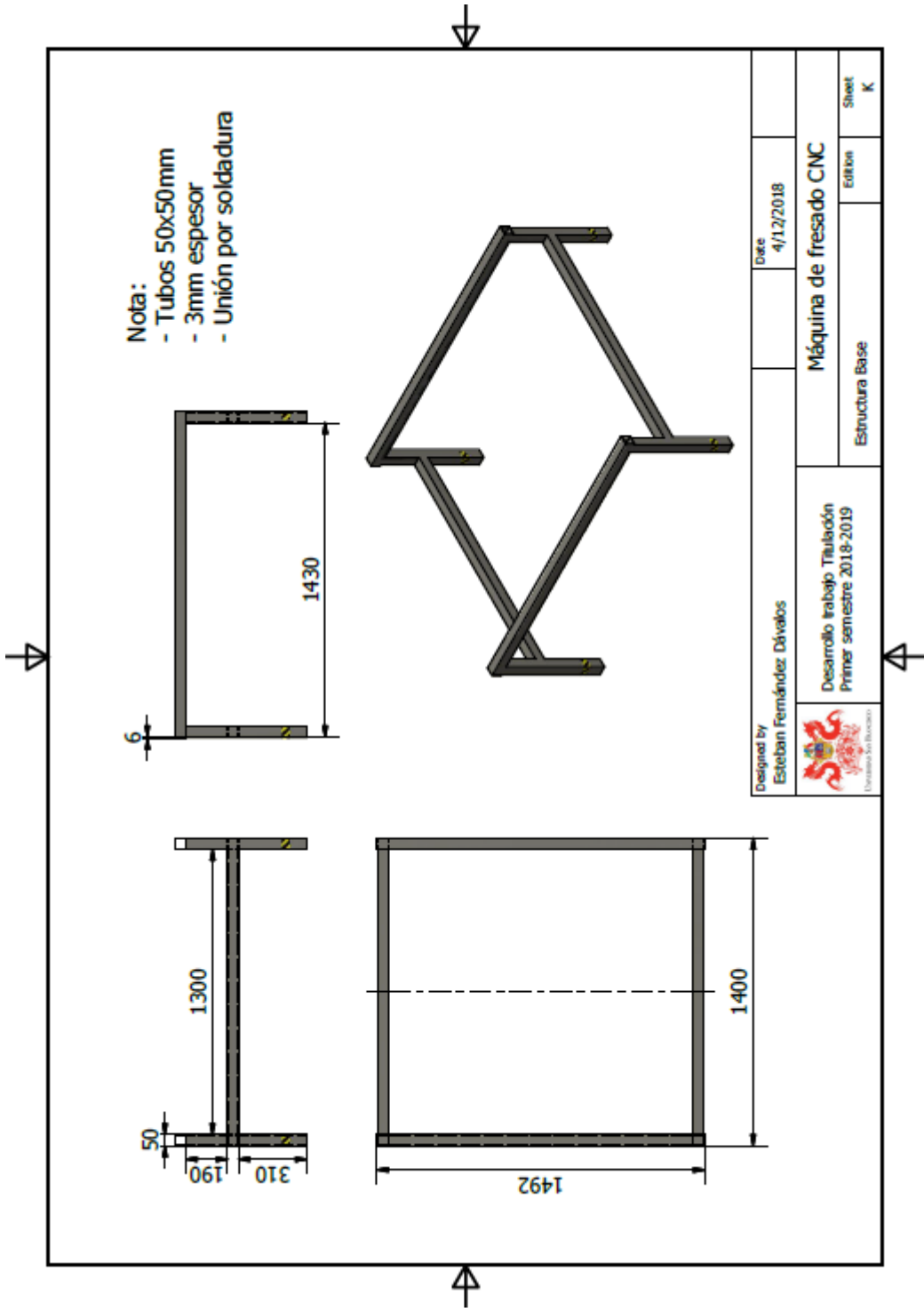
# ANEXO I: PLANO Z PLATE.



## ANEXO J: PLANO PORTAHERRAMIENTA.



ANEXO K: PLANO ESTRUCTURA BASE.



## ANEXO L: TORQUE EN TORNILLO DE POTENCIA.

### PRODUCT FACTS

#### Torque on ball screw shaft

To calculate the torque on the ball screw shaft, we recommend you to use the below calculation.

$$\frac{F \times l}{2000 \times \pi \times 0.9} = \text{(TB) Torque on ball screw shaft (Nm)}$$

F = Axial load on ball screw (N)

l = lead on ball screw (mm)

(example: Ball screw SF5201Q, l = 10)

